

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

Snímač intenzitního profilu laserových svazků

XY Assembly for Laser Beam Intensity Profile Measurement

2015

Bc. Daniel Daubner

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Daniel Daubner**
Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika
Téma: **Snímač intenzitního profilu laserových svazků**
XY Assembly for Laser Beam Intensity Profile Measurement

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s funkcí a skladbou atmosférického optického spoje. Popište jeho parametry a vlastnosti. Sumarizujte jeho výhody a nevýhody, použití, současný stav a možné budoucí trendy.
2. Podrobně nastudujte fyzikální popis vyzařovací charakteristiky laserového vysílače a vliv atmosféry na svazek.
3. Pomocí vhodného programu modelujte rozložení optické intenzity v různých rovinách kolmých na osu vysílaného svazku.
4. V experimentální části své práce ověřte teoretické závěry týkající se vysílacího svazku a ukažte rozložení variance optické intenzity v závislosti na daném intenzitním profilu svazku.
5. Z hlediska minimalizace fluktuací přijímaného optického výkonu navrhnete optimální tvar a pološířku svazku v rovině přijímače. Součástí projektu je optimalizace programu pro řízení polohy snímače optického výkonu na zapisovači a návrh sběru dat přijímaného výkonu pro vyhodnocení strukturního parametru indexu lomu atmosféry.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] OSHE, G. R. Optical Detection Theory for Laser Applications. New Jersey: Wiley, 2002. ISBN 0-471-22411-1
[2] SALEH, B. E. A. Základy fotoniky. Praha: Matfyzpress, 1995. ISBN 80-85863-00-6
[3] DAVID, Tomáš. Testovací měření na profesionálním atmosférickém optickém spoji. Ostrava, 2011. Bakalářská práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Jan Látal

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Vitásek**


Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry






prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne parametre a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: 6. mája 2015


.....
podpis študenta

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval Ing. Jánovi Vitáskovi Ph.D. za odbornú pomoc, konzultácie, ochotu a starostlivosť pri tvorení tejto diplomovej práce.

Abstrakt

Ciele diplomovej práce je podrobne preštudovať atmosférické optické spoje, ich časti a vlastnosti laserových zväzkov. Práca popisuje ich vlastnosti, parametre a vplyvy. Následne sa teoretické závery využívajú pri modelovaní konkrétnych laserových zväzkov. Experimentálna časť práce zobrazuje reálne laserové zväzky. Skúma ich vlastnosti a správanie vzhľadom na teplotné vplyvy. Z tejto časti vychádzajú závery pre návrh optimálneho tvaru zväzku z hľadiska minimalizácie fluktuácií optického výkonu. Súčasťou diplomovej práce je aj optimalizácia programu pre meranie intenzitného profilu laserového zväzku s návrhom zberu dát prijatého výkonu.

Kľúčové slová

Atmosférický optický spoj; Atmosférické prenosové prostredie; Modelovanie laserového zväzku; Intenzitný profil laserového zväzku; Fluktuácie optického výkonu; Matlab; LabVIEW

Abstract

The goals of master's thesis are detailed study of free space optics. This work describes their characteristics, parameters and effects. Consequently, the theoretical conclusions are used in the modeling of specific fiber beams. Experimental section of thesis shows real laser beams. It examines their properties and behavior with respect to temperature effects. The design of optimal optical beam shape in term of minimizing fluctuations of optical power is based on conclusions from this section. Part of master's thesis is the program optimization for laser beam intensity profile measurement with a design for data collection of received power.

Key words

Free space optics; Atmospheric transmission media; Laser beam modelling; Laser beam intensity profile; Optical power fluctuations; Matlab; LabVIEW

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
P_{LD}	W	Výkon laserovej diódy
α_{vLD}	dB	Účinnosť väzby laserovej diódy s vysielacou optickou sústavou
α_{vos}	dB	Priepustnosť vysielacej optickej sústavy
α_{pos}	dB	Priepustnosť prijímacej optickej sústavy
α_{pv}	dB	Priepustnosť optických priezorov vysielacej optickej sústavy
α_{pp}	dB	Priepustnosť optických priezorov prijímacej optickej sústavy
α_{vp}	dB	Útlm šírenia
γ_{pos}	dB	Zosilnenie prijímacej optickej sústavy
α_{vFD}	dB	Účinnosť väzby prijímacej optickej sústavy a fotodiódy
α_z	dB	Útlm vyvolaný nedokonalosťou vzájomného zamierenia hlavíc spoja
ρ_{atm}	dB	Rezerva spoja na atmosférickej prenosové prostredie
P_{min}	dBm	Minimálny detekovateľný výkon fotodiódy
P_{max}	dBm	Úroveň prijímaného výkonu, pri ktorej dochádza k saturácii prijímača
P_0	dBm	Citlivosť prijímacieho systému
L_{vp}	m	Vzdialenosť medzi hlavicami AOS
L_0	m	Pomocná dĺžka
SNR_0	dB	Minimálna hodnota pomeru signálu a šumu
D_{vos}	m	Priemer vysielacej optickej sústavy
D_{pos}	m	Priemer prijímacej optickej sústavy
ϕ_{vs}	°	Uhlová šírka vysielaného zväzku
vp	$Mb \cdot s^{-1}$	Prenosová rýchlosť
A_{spot}	m	Veľkosť škvrny

Δp	dBm	Oblasť dynamiky prijímacieho systému
x	m	Dĺžka trasy
$\alpha_e(\lambda)$	m^{-1}	Koeficient útlmu
$\alpha_a(\lambda)$	m^{-1}	Koeficient absorpcie
$\alpha_R(\lambda)$	m^{-1}	Koeficient Raylieghovho rozptylu
$\alpha_M(\lambda)$	m^{-1}	Koeficient Mieovho rozptylu
$I_x(\lambda, t', x)$	$W \cdot m^{-2}$	Intenzita optického zväzku po prechodu cez trasu dĺžky x
I	$W \cdot m^{-2}$	Optická intenzita
λ	nm	Vlnová dĺžka
t'	s	Priestorová a časová zmenu koncentrácie častíc spôsobujúcich útlm
T	%	Priepustnosť atmosféry
V_M	km	Meteorologická viditeľnosť
α	$dB \cdot km^{-1}$	Koeficient útlmu
q	-	Parameter určený empirickými modelmi (Kim, Kruske)
σ_I^2	$W \cdot m^{-2}$	Relatívna variácia optickej intenzity
n	-	Index lomu
b	-	Bod
$D_n(b_1, b_2)$	-	Štruktúrna funkcia fluktuácií indexu lomu
$n(b)$	-	Index lomu v bode b
S_0	mm	Vonkajšia stupnica turbulentných vírov
s_0	mm	Vnútoraná stupnica turbulentných vírov
C_n^2	$m^{-2/3}$	Miera sily turbulencie
W	$m \cdot s^{-1}$	Vertikálny priemer druhej mocniny rýchlosti vetra
a	m	Nadmorská výška
$v(a)$	$m \cdot s^{-1}$	Rýchlosť vetra vo výške a
u	-	Náhodná premenná
A	-	Funkcia náhodnej premennej

c	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Rýchlosť svetla
E_g	eV	Energia zakázaného pásu
E_e	eV	Energia elektrónu
E_h	eV	Energia diery
h	$\text{eV} \cdot \text{s}$	Planckova konštanta
L	m	Dĺžka
N	-	Prirodzené číslo
E_s	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	Elektrické pole
E₀	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	Veľkosť amplitúdy elektrického poľa na ose z
r	m	Vzdialenosť príslušného bodu od osi z
I_s	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Intenzita v strede zväzku
η	Ω	Charakteristická impedancia prostredia
ω₀	m	Miera straty poľa od osi z
P(∞)	W	Celkový výkon prenášaný zväzkom
P(r)	W	Výkon zväzku obsiahnutý pod polomerom r
ω(z)	m	Polomer lúča
ω₁	m	Polomer zväzku v pozícii z = 0
X_R	m	Rayleighov rozsah
D	m	Priemer Gaussovho zväzku
R(z)	m^2	Zakrivenie vlnoplochy
m	-	Celé číslo
p	-	Celé číslo
E_{m,p}	-	Faktor upravujúci mierku
k	-	Celé číslo
H_m	-	Hermitov polynom
TEM	-	Mód Gaussovho zväzku
E²	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Intenzita
w_x	mm	Pološírka zväzku z pohľadu osi X
w_y	mm	Pološírka zväzku z pohľadu osi Y
FWHM	cm	Šírka zväzku v mieste jeho polovičnej intenzity

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Význam
AOS	Atmosférický Optický Spoj
OBS	Optický Bezkáblový Spoj
APP	Atmosférické Prenosové Prostredie
PS	Prijímací Systém
VS	Vysielací Systém
LAN	Local Area Network
WAN	Wide Area Network
ČTU	Český Telekomunikačný Úrad
LD	Laserová Dióda
POS	Prijímacia Optická Sústava
VOS	Vysielacia Optická Sústava
FD	Fotodióda
SNR	Signal to Noise Ratio
AFD	Aktívna plocha Fotodiódy
OOK	On-off Keying
BER	Bit Error Rate
Č.	Číslo
Tab.	Tabuľka
Obr.	Obrázok
Resp.	Respektíve
Tx	Transmitter
Rx	Receiver
LED	Luminiscenčná dióda
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MSM	Metal Semiconductor Metal
APD	Avalanche Photodiode
CD	Compact Disc

DVD	Digital Video Disc
PC	Personal Computer
LBIP	Laser Beam Intensity Profile
DLBIP	Data of Laser Beam Intensity Profile
Tzv.	Takzvaný
3D	Trojrozmerný
2D	Dvojrozmerný
DTS	Distributed Temperature Sensing
USB	Universal Serial Bus
SM	Single Mode
FWHM	Full Width at Half Maximum
Elip.	Elipticita

Obsah

Úvod.....	- 14 -
1 Atmosférické optické spoje.....	- 16 -
1.1 Vlastnosti atmosférického spoja.....	- 16 -
1.2 Parametre AOS a energetická bilancia.....	- 18 -
2 Atmosférické prenosové prostredie, jeho zloženie a javy	- 21 -
2.1 Fyzikálne a chemické zloženie atmosféry.....	- 21 -
2.1.1 Tlak, teplota, koncentrácia molekúl plynov v štandardnej atmosfére	- 22 -
2.1.2 Častice obsiahnuté v štandardnej atmosfére.....	- 23 -
2.2 Spektrálna závislosť a priepustnosť atmosféry	- 25 -
2.3 Javy vznikajúce počas šírenia optického zväzku.....	- 25 -
2.3.1 Extinkcia optickej intenzity.....	- 26 -
2.3.2 Turbulencia optickej intenzity.....	- 28 -
3 Optické zdroje a detektory pre AOS	- 31 -
3.1 Optické zdroje	- 31 -
3.1.1 Luminiscenčné diódy	- 31 -
3.1.2 Laserové diódy	- 33 -
3.1.3 Porovnanie LED a LD	- 34 -
3.2 Fotodetektory	- 35 -
3.2.1 Fotodióda PIN	- 36 -
3.2.2 Lavínová fotodióda (APD).....	- 37 -
3.2.3 Fotodióda MSM	- 37 -
4 Svetelný zväzok.....	- 39 -
4.1 Gaussov zväzok.....	- 39 -
4.2 Gaussove zväzky vyššieho rádu	- 43 -
4.3 Top Hat zväzok	- 45 -
4.3.1 Získanie Top Hat zväzku pomocou ostriaceho systému	- 46 -
4.3.2 Získanie Top Hat zväzku pomocou plankonvexnej šošovky	- 47 -
5 Modelovanie rozloženia optickej intenzity	- 49 -
5.1 Rozloženie optickej intenzity Gaussovho zväzku	- 49 -

5.2	Rozloženie optickej intenzity Top Hat zväzku.....	- 51 -
6	Program pre meranie profilu laserového zväzku.....	- 53 -
6.1	Čelný panel.....	- 53 -
6.2	Návod na použitie.....	- 54 -
6.3	Popis použitých premenných.....	- 58 -
6.4	Blokový diagram programu.....	- 58 -
6.4.1	Základné nastavenie (Časť 1, 2).....	- 60 -
6.4.2	Nastavenie parametrov merania (Časť 3).....	- 61 -
6.4.3	Meranie (Časť 4).....	- 63 -
6.4.4	Ukončenie programu (Časť 5).....	- 67 -
6.4.5	Cyklus nápoede	- 67 -
6.5	Vizualizácia meraných dát	- 68 -
7	Experimentálna časť.....	- 71 -
7.1	Popis merania	- 71 -
7.1.1	Meranie základného profilu LD	- 71 -
7.1.2	Meranie upraveného profilu LD	- 72 -
7.2	Použité zariadenia a software	- 73 -
7.3	Schémy meraní	- 74 -
7.4	Postup merania	- 76 -
7.5	Výsledky merania.....	- 77 -
7.5.1	Výsledky merania základného profilu LD.....	- 79 -
7.5.2	Výsledky merania upraveného profilu LD	- 83 -
7.6	Vyhodnotenie	- 88 -
	Záver	- 95 -
	Použitá literatúra	- 97 -
	Zoznam príloh	- 105 -

Úvod

Diplomová práca sa zaoberá problematikou intenzitného profilu laserových zväzkov prenášaného atmosférickým prostredím z pohľadu atmosférického optického spoja. V úvode práce je podrobne rozobratý princíp, zloženie, vlastnosti a parametre atmosférického optického spoja. V ďalších kapitolách je problematika rozvedená o podrobný popis vlastností so stavbou samotnej atmosféry. V rámci jej vlastností práca rozoberá aj vplyvy atmosféry na prenos svetelného zväzku a prekážky, ktoré mu toto prenosové prostredie kladie. Následne sa pohľad presúva na zdroje a detektory používané v atmosférických optických spojoch. V spracovaní je možné nájsť popis a vlastnosti niekoľkých typov týchto zariadení, ktoré sú neodmysliteľnou súčasťou atmosférických optických spojov.

Po zoznámení s atmosférickým prostredím a jeho časťami prechádza práca k študovaniu tvarov intenzitných profilov laserových zväzkov. Najprv sú rozobrané vlastnosti a parametre Gaussovho zväzku s náhľadom na jeho vyššie rády. Potom sa kapitola venuje zväzku typu Top Hat. Rozobraný je jeho popis a rôzne spôsoby realizácie.

Teoretické podklady týchto častí boli potom využité v časti modelovania. Nasledovná časť práce opisuje modelovanie vyššie spomínaných intenzitných tvarov zväzkov. Cieľom nie je len modelovať trojrozmerné tvary zväzkov ale aj ich dvojrozmerné modely z pohľadu rôzneho počtu osí. To bolo tvorené pomocou skriptovacích súborov programu Matlab.

Pred tým, než je možné prejsť na experimentálnu časť, ktorá má za úlohu overiť skutočnosť sa práca pozastavuje nad optimalizáciou programu pre meranie profilu laserových zväzkov. V týchto kapitolách sa nachádza detailný popis zloženia programu, jeho funkcie a vlastností. Dôvod tak podrobného popisu je ten, že v prípade modifikácie, úpravy tohto programu, či tvorbe programu podobného vytvárajú kapitoly dobrý odrazový mostík pre čo najlepšie pochopenie tejto problematiky. Samotný program spolu s hardvérom, ktorý ovláda, je použitý v experimentálnej časti ako jeden z najhlavnejších blokov merania. Má na starosti automatické ovládanie polohy, meranie, priemerovanie a ukladanie dát. Experimentálna časť bola zrealizovaná za pomoci tohto programu.

V záverečnej časti optimalizácie je uvedený popis dopĺňajúceho programu, ktorý je využitý pre vizualizáciu uložených dát. Vizualizácia nameraného zväzku je vďaka nemu možná nielen pomocou trojrozmerného grafu ale aj pomocou dvojrozmerných grafov z pohľadu rôznych priestorových osí.

Samotná experimentálna časť sleduje vlastnosti a tvar použitých laserových modulov. Jej cieľom je potvrdenie teoretických záverov a zobrazenie rozloženia intenzity už reálnych optických zväzkov. Experimentálna časť sa taktiež ďalej zaoberá ovplyvňovaním zväzkov dvoch laserových modulov dvomi zdrojmi ohrevu s porovnaním zväzku samotného bez vplyvov. Okrem toho rovnakým spôsobom nazerá na upravené profily týchto dvoch modulov opäť s dvomi zdrojmi ohrevu.

Vzhľadom na zdroje ohrevu je táto časť doplnená o meranie DTS systému. Vďaka nemu je možné lepšie nahliadnuť na rozloženie zmien teploty, ktorým laserový zväzok musel čeliť.

Výsledky experimentálnej časti sú porovnané s teoretickými závermi. Popisujú vplyv fluktuácií optického výkonu na optický zväzok a porovnávajú rozdiely medzi meraniami bez tepelného vplyvu a s vplyvom dvomi rôznymi zdrojmi ohrevu, spolu s dvomi typmi laserových modulov a dvomi typmi tvaru vysielaného zväzku. Výsledky zároveň dopomáhajú k záverom týkajúcim sa návrhu tvaru optického zväzku vhodného na prenos a čo najodolnejším voči fluktuáciám optického výkonu.

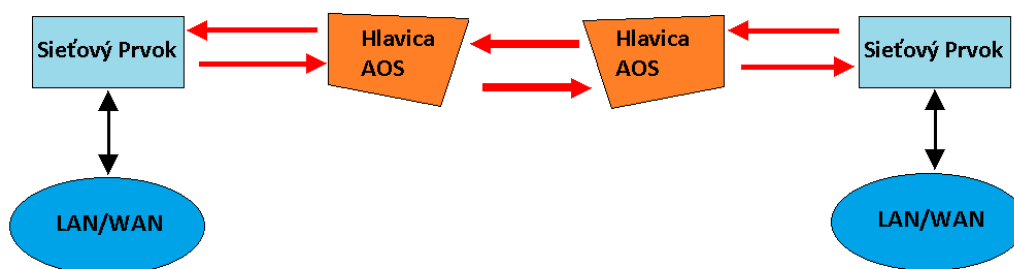
1 Atmosférické optické spoje

Atmosférickým optickým spojom (AOS), alebo tiež optický bezkáblový spoj (OBS) je plne duplexný spoj, ktorý k prenosu informácie optickou nosnou vlnou využíva atmosférické prenosové prostredie (APP). Optická nosná vlna obsahuje jeden alebo viac vlnovo delených kanálov, ktorých optický výkon je sústredený do jedného alebo niekoľkých úzkych svetelných zväzkov.

Jedná sa o optické spoje realizované v uzavretej miestnosti, vo voľnom ovzduší respektíve v troposfére alebo v kozmickom priestore. Značný vplyv na kvalitu prenosu má práve APP, pretože je všeobecne prostredím nehomogénnym a nestacionárnym. Taktiež sa predpokladá, že je dielektrické, lineárne, nedisperzné a izotropné. Každý jeho vplyv na spoj má náhodný charakter.

1.1 Vlastnosti atmosférického spoja

AOS sa skladá z dvoch hlavíc pracujúcim v plne duplexnom režime medzi sebou. Každá hlavica je pripojená (plne duplexne) k počítači, serveri, či inému využiteľnému prvku siete. Hlavice sú vybavené prijímacím a vysielačím systémom (PS a VS) pre komunikáciu skrz APP, tak ako je zobrazené na obrázku 1.1.

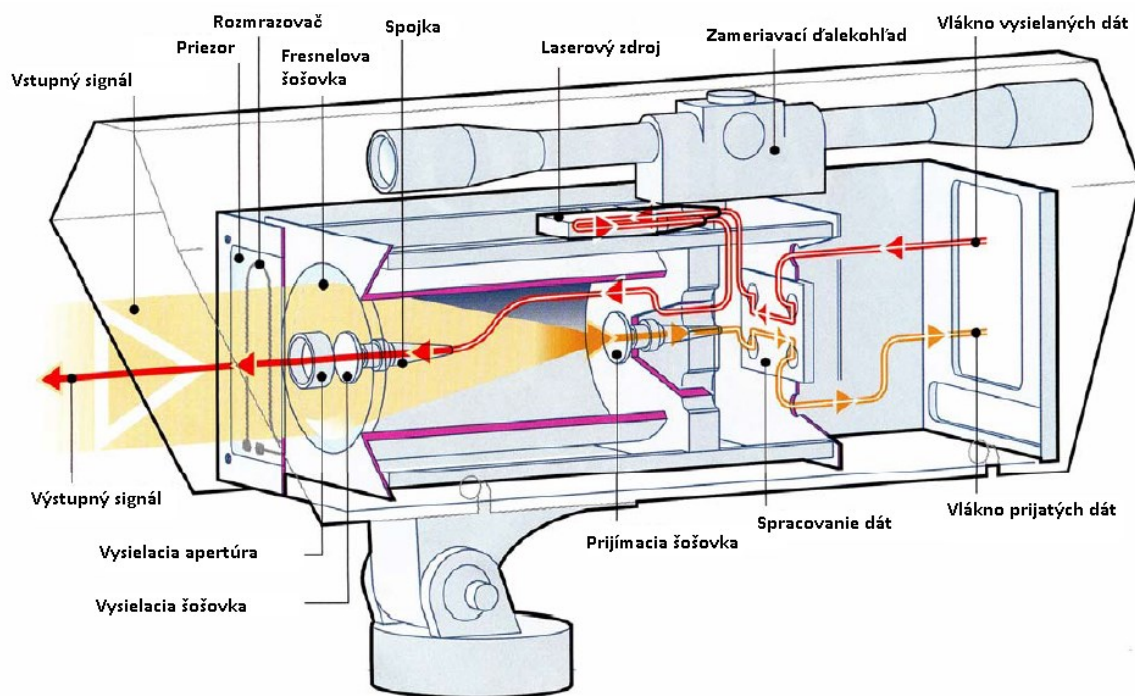


Obrázok 1.1: *Blokové schéma AOS*

Vysielačiaci systém má za úlohu tvarovať vyžarovaný zväzok a zabezpečovať jeho moduláciu. Vysielacia časť hlavice priamo dáta pomocou vlákna vysielaných dát. Tieto dáta sú namodulované modulátorom a pomocou laserového zdroja vyslané skrz vysielačiu optickú sústavu (vysielačie šošovky, priezor) von z hlavice. Táto sústava má tiež na starosti priestorové tvarovanie optického zväzku. Priezor potom nemôže vyvolať deformáciu tohto zväzku alebo jeho nadmerný útlm.

Prijímací systém pomocou prijímacej optickej sústavy zachytiť čo najlepšie prijímací zväzok svetla. Prijímacia časť hlavice zachytáva vstupný signál cez priezor napríklad pomocou Fresnelovej šošovky. Tá sústreďuje svetlo pre prijímaciu šošovku. Z nej signál smeruje vláknom do časti pre spracovanie dát. Konkrétne detektor a demodulátor. Odtiaľ potom pokračuje optický signál von výstupným optickým vláknom, prípadne smeruje do konvertora pre elektrický signál.

Priezor v hlavici slúži pre ochranu pred nečistotami, vlhkosťou, vody a iných častíc, ktoré by mohli poškodiť vysielaciu alebo prijímaciu časť. Niektoré hlavice obsahujú vyhrievané sklá respektíve priezory s rozmrazovačom ako je vyznačené v obrázku 1.2.



Obrázok 1.2: Atmosférická optická hlavica [1]

V dnešnej dobe sa stretávame s väčším množstvom vysieláčov v jednej hlavici pre väčšiu spoľahlivosť zdroja. [2]

Hlavica taktiež obsahuje zameriavací systém zostavujúci sa z ďalekohľadu. Tento systém slúži pre zameranie osi pre zväzok s druhou hlavicom. Toto zameranie môže byť uskutočnené mechanicky alebo elektronicky.

Atmosférický spoj je možné deliť podľa nasledovných kritérií: Vzhľadom na dosah sa delia na veľmi krátke (0 - 10 m), krátke (10 - 100 m), stredné (100 - 1000 m) a dlhé (viac než 1 km). Podľa spôsobu prenosu sa rozlišujú spoje s koherentnou alebo nekoherentnou metódou prenosu. Podľa prenosovej rýchlosti je možné tieto spoje deliť na nízke (nižšie než 1 Mb/s), stredné (1 - 10 Mb/s) a vysoké (viac než 10 Mb/s).

Pre potreby AOS je zväzok tvarovaný osovo symetrickou optickou sústavou. Pri energetickej bilancii sa priradzuje k pôvodnému zväzku energeticky ekvivalentný zväzok. Tiež definovaný ako Gaussov zväzok. Ten má na ose zväzku intenzitu ako pôvodný zväzok a v jeho kruhovej stope je obsiahnutý rovnaký výkon ako v eliptickej stope pôvodného zväzku.

AOS oproti rádiovým spojom má zásadné výhody, a to:

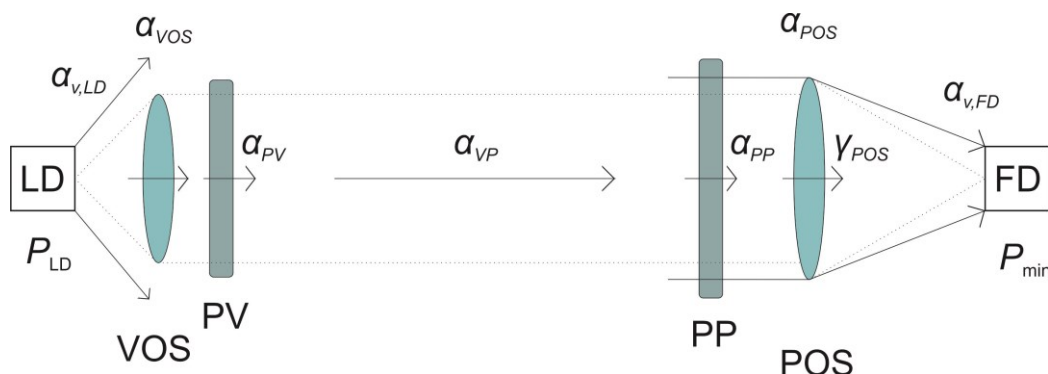
- Vysoký smerový zväzok, z čoho vyplýva vysoká priestorová selektivita a nehrozí interferencia s inými spojmami.

- Vysoká prenosová rýchlosť, ktorá umožňuje nasadenie AOS vo všetkých typoch počítačových sietí.
- Tento typ spoja nemá kladené žiadne legislatívne prekážky. To urýchľuje rozvoj sietí. Optické pásmo totiž leží mimo oblasť pôsobnosti ČTU.
- Šetrí náklady výkopových prác, či budovania závesu, čo je potrebné pre spoj vedený optickým vláknom.

Nevýhodou AOS sú negatívne vplyvy atmosférického prenosového prostredia, ktorému sa venuje kapitola č. 2. Ďalšími obmedzujúcimi faktormi môžu byť vlastnosti vysieláčov a prijímačov. Ich bariéry budú ale v budúcnosti prekonávané a to skôr na materiálnej úrovni, než na úrovni čipov.

1.2 Parametre AOS a energetická bilancia

Energetická bilancia AOS zahŕňa (obr. č. 1.3): výkon laserovej diódy P_{LD} , účinnosť väzby laserovej diódy s vysielacou optickou sústavou α_{vLD} , priepustnosť vysielacej a prijímacej optickej sústavy α_{VOS} a α_{POS} , priepustnosť optických priezorov α_{PV} a α_{PP} , útlm šírenia α_{VP} , zosilnenie prijímacej optickej sústavy γ_{POS} , účinnosť väzby prijímacej optickej sústavy a fotodiódy α_{vFD} , útlm vyvolaný nedokonalosťou vzájomného zamierenia hlavíc spoja α_z , rezervu spoja na atmosférickej prenosové prostredie p_{atm} , minimálna hodnota pomeru signálu a šumu SNR_0 , minimálny detekovateľný výkon fotodiódy P_{min} , citlivosť prijímacieho systému P_0 a úroveň prijímaného výkonu, pri ktorej dochádza k saturácii prijímača P_{max} .



Obrázok 1.3: Miesta útlmu a zosilnenia v energetickej bilancii AOS

Účinnosť väzby α_{vLD} závisí na uhlovej šírke, numerickej apertúre a rozložení zväzku vyžarovaným LD. V decibelovej miere je možné α_{vLD} vyjadriť

$$\alpha_{vLD} = \left| 10 \log \frac{P_{VOS}}{P_{LD}} \right|, \quad (1.1)$$

kde P_{VOS} je výkon dopadajúci na apertúru vysielacej optickej sústavy, P_{LD} je výkon laserovej diódy zdroja. V praxi sa dá predpokladať útlm väzby α_{vLD} v hodnotách približne 1,5 dB.

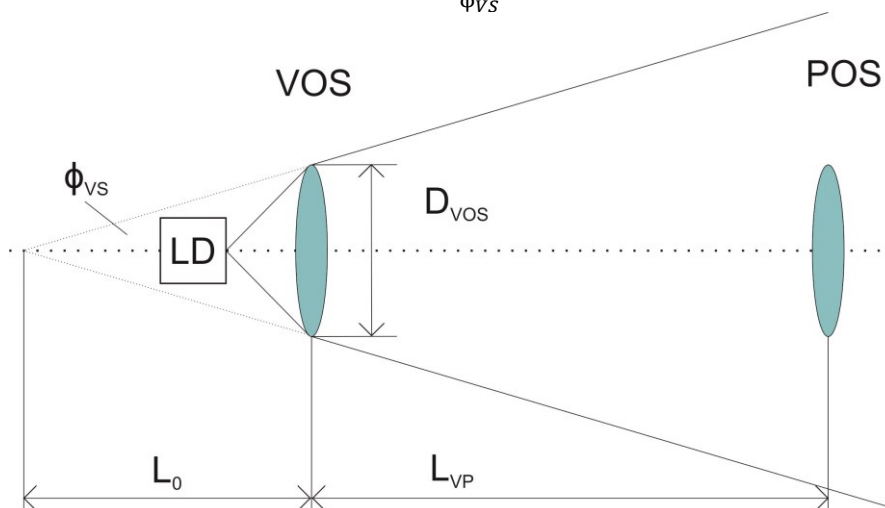
Útlm šírenia určujeme výrazom

$$\alpha_{VP} = \left| 20 \log \frac{L_0}{L_0 - L_{VP}} \right|, \quad (1.2)$$

kde L_{VP} je vzdialenosť medzi hlavicami spoja a L_0 je takzvaná pomocná dĺžka vyznačená na obrázku č. 1.4.

K vyjadreniu L_0 je potrebné poznať hodnotu priemeru vysielacej optickej sústavy D_{VOS} a uhlovú šírku vysielaného zväzku ϕ_{VS} . Potom je možné L_0 vyjadriť ako:

$$L_0 \approx \frac{D_{VOS}}{\phi_{VS}}. \quad (1.3)$$



Obrázok 1.4: Znáznornenie významu pomocnej dĺžky

Zosilnenie prijímacej optickej sústavy určujeme pomerom plôch prijímacej a vysielacej apertúry, rozložením intenzity v Gaussovom zväzku a umiestnením stredu prijímacej apertúry v ose Gaussovho zväzku. V decibelovej miere zosilnenie vyjadrujeme ako:

$$\gamma_{POS} = \left| 20 \log \frac{D_{POS}}{D_{VOS}} \right| + 3 \text{ dB}. \quad (1.4)$$

Účinnosť väzby medzi prijímacou optickou sústavou a fotodiódou α_{vFD} závisí od pomeru aktívnej plochy fotodiódy AFD a veľkosti škvŕny A_{spot} , ktorá v ohniskovej rovine prijímacej optickej sústave vytvára prijaté svetlo. To platí samozrejme za predpokladu konštantného ožiarenia prijímacej apertúry. Pre $AFD \geq A_{spot}$ je $\alpha_{vFD} = 0 \text{ dB}$.

Rezerva spoja na atmosférickom prenosovom prostredí ρ_{atm} je možné odvodiť od dlhodobého merania útlmu APP. Jeho hodnotu je možné zvoliť pre príklad 6 dB/km.

Minimálna hodnota SNR_0 sa stanovuje na závislosti typu modulácie a požadovanej chybovosti BER. V prípade použitia modulácie typu OOK a chybovosti spoja $BER = 10^{-6}$ nesie SNR_0 prekročiť hodnotu 13,5 dB.

Minimálny detekovateľný výkon prijímača P_{min} je závislý od prenosovej rýchlosti, šumových parametroch predzosilňovača a typu použitej diódy. Napríklad pre fotodiódu PIN s použitou prenosovou rýchlosťou $\nu p_1 = 10$ Mb/s býva táto hodnota P_{min} približne -43 dBm.

Citlivosť prijímacieho systému je nadefinovaná ako minimálna úroveň prijatého optického výkonu P_0 . Tá je nutná k dosiahnutiu stanovenej hodnoty SNR_0 .

Jej vzťah má podobu:

$$P_0 = P_{min} + SNR_0. \quad (1.5)$$

Úroveň prijímaného výkonu, pri ktorom dochádza k saturácii prijímača P_{max} je posledný parameter energetickej bilancie AOS. Výraz

$$\Delta p = P_{max} - P_0 \quad (1.6)$$

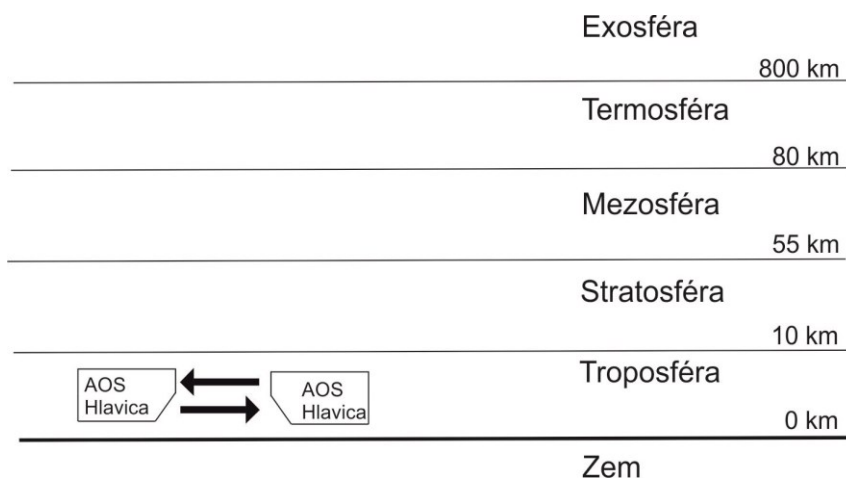
definuje oblasť dynamiky prijímacieho systému. Tá je vzhľadom k vysokej miere fluktuácií prijímaného výkonu, respektíve vplyv šumu APP, významnou veličinou. Hodnota tohto parametru v decibelovej miere býva približne 30 dB.

Útlm vyvolaný nedokonalosťou vzájomného zamerania hlavíc spoja α_z spôsobujú rôzne vplyvy. Príčinou môže byť ľudský faktor ako napríklad neskúsenosť obsluhy pri zameriavaní. Taktiež medzi tieto vplyvy patria aj mechanické deformácie úchytu pri aretácií, teplotnými deformáciami konzol a podobne. Empirickým zistením bol odhalený fakt, že hodnota tohto útlmu neprevyšuje 1,5 dB.

2 Atmosférické prenosové prostredie, jeho zloženie a javy

Atmosférické prenosové prostredie (APP) má značný vplyv na kvalitu prenosu AOS. Všeobecne sa dá stanoviť, že APP je prostredie nestacionárne a nehomogénne. Taktiež sa predpokladá, že je tiež dielektrické, lineárne, nedisperzné a izotropné. Jeho vplyv na kvalitatívne parametre prenosového kanálu AOS má náhodný charakter. Z tohto dôvodu je možné APP opísať len empiricky.

V atmosfére dochádza k viacerým javom, ktoré ovplyvňuje svetlo. Ide o jeho prenos, absorpciu, emisiu, ohybu a odrazu. K tomuto ovplyvňovaniu dochádza kvôli zloženiu atmosféry. Tá sa skladá z rôznych druhov molekúl a malých častíc ako napríklad prachové častice, aerosóly a voda. Zemská atmosféra sa skladá z piatich charakteristických vrstiev. Na obrázku č. 2.1 je znázornený zvislý prierez atmosférou s vyznačením zemského povrchu.



Obrázok 2.1: Vrstvy atmosféry s vyznačením zemského povrchu a pracovnej oblasti APP

Z obrázku je jasne vidieť, že APP je súčasťou troposféry. Tá je charakteristická tým, že sa v nej uskutočňuje kondenzácia vodnej pary. Tvorí sa v nej hmly a oblaky, vzniká dážď, sneh, búrky, vietor, veterné víry a nachádza sa v nej množstvo prachových častí rôznych veľkostí.

2.1 Fyzikálne a chemické zloženie atmosféry

Atmosféra je svojimi vlastnosťami blízko podobná tekutine zložená z častíc, plynov a aerosólov, ktorých chemické a fyzické vlastnosti sa líšia vzhľadom na čas, nadmorskú výšku a geografickú pozíciu. Tieto vlastnosti môžu výrazne závisieť od lokálnych a regionálnych podmienok. Množstvo optických vlastností atmosféry môžeme adekvátne popísať pri pohľade na jej zloženie, ktoré môžeme nazvať štandardnou atmosférou.

2.1.1 Tlak, teplota, koncentrácia molekúl plynov v štandardnej atmosfére

Ako už bolo spomínané drvivá väčšina atmosféry sa skladá z ľahkých molekulárnych plynov. Zoznam hlavných plynov a stopových druhov pozemskej atmosféry je uvedený v tabuľke č. 2.1. Tabuľka tiež popisuje ich koncentráciu v jednotkách atmosfér pri štandardnej izbovej teplote 22.85 °C (Prevedené zo stupňov Kelvina), nulovej nadmorskej výške a pri celkovom tlaku 1 atmosfér.

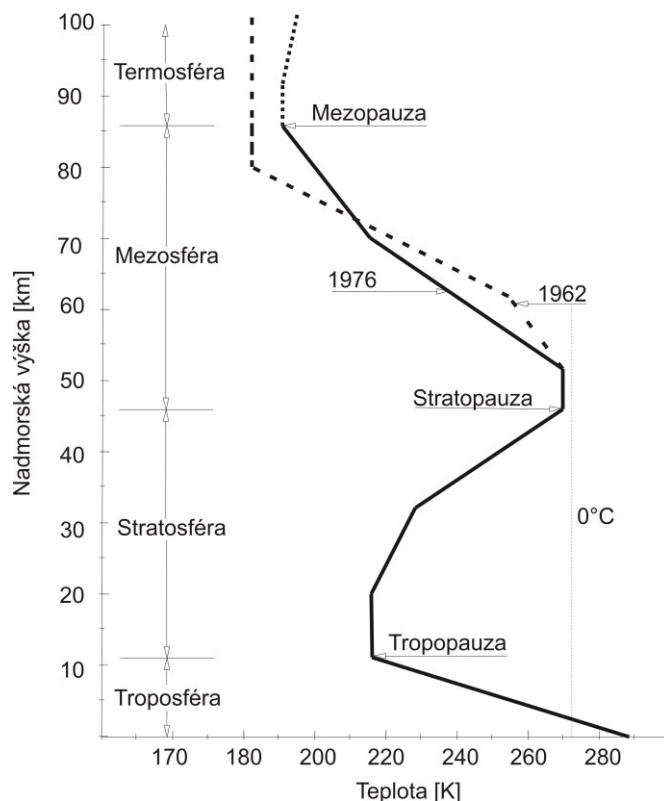
Molekuly	p (atm)
N ₂	0,781
O ₂	0,209
H ₂ O	0,0775 (premenná)
CO ₂	$3,3 \cdot 10^{-4}$
A (Argón)	0,0093
CH ₄	$1,7 \cdot 10^{-6}$
N ₂ O	$3,2 \cdot 10^{-7}$
CO	$1,5 \cdot 10^{-7}$
O ₃	$2,66 \cdot 10^{-8}$ (premenná)
H ₂ CO	$2,4 \cdot 10^{-9}$
C ₂ H ₆	$2 \cdot 10^{-9}$
HCl	$1 \cdot 10^{-9}$
CH ₃ Cl	$7 \cdot 10^{-10}$
OCS	$6 \cdot 10^{-10}$
C ₂ H ₂	$3 \cdot 10^{-10}$
SO ₂	$3 \cdot 10^{-10}$
NO	$3 \cdot 10^{-10}$
H ₂ O ₂	$2 \cdot 10^{-10}$
HCN	$1,7 \cdot 10^{-10}$
HNO ₃	$5 \cdot 10^{-11}$
NH ₃	$5 \cdot 10^{-11}$
NO ₂	$2,3 \cdot 10^{-11}$
HOCl	$7,7 \cdot 10^{-12}$
HI	$3 \cdot 10^{-12}$
HBr	$1,7 \cdot 10^{-12}$

Tabuľka 2.1: Koncentrácia plynov v štandardnej atmosfére (poznámka: plyny označené ako premenné sa vyskytujú v atmosfére menej, než $1 \cdot 10^{-9}$ a ich hodnota výrazne závisí od emisie lokálnych zdrojov)[3]

Primárne opticky aktívne molekuly plynov v štandardnej atmosfére sú N₂, O₂, H₂O, a CO₂. Medzi sekundárne aktívne molekuly patria CH₄, N₂O, CO, a O₃. 14 druhov uvedených v tabuľke patrí v atmosfére prítomné na pozorovacej úrovni. V tabuľke nie je uvedených 8 druhov plynov nachádzajúcich sa na pozorovateľnej úrovni v našej atmosfére, kvôli ich malému

obsahu. Napriek tomu ich koncentrácia v atmosfére môže byť zvýšená vzhľadom na lokálnu emisiu týchto plynov.

Teplota atmosféry sa mení nielen vzhľadom na zmenu nadmorskej výšky ale aj vzhľadom k sezónnym zmenám. V obrázku č. 2.2 môžeme vidieť graf priemernej teploty vzhľadom na nadmorskú výšku štandardnej atmosféry. V grafe môžeme vidieť výrazne klesajúcu teplotu vzhľadom na narastajúcu nadmorskú výšku a to až do úrovne stratosféry, kde teplotný profil inflexný bod.

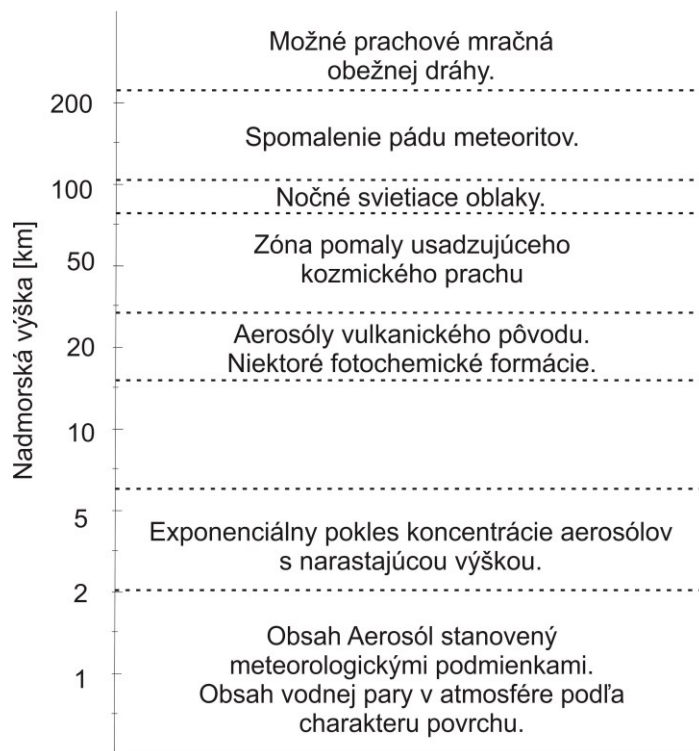


Obrázok 2.2: Graf priemernej teploty atmosféry voči nadmorskej výške

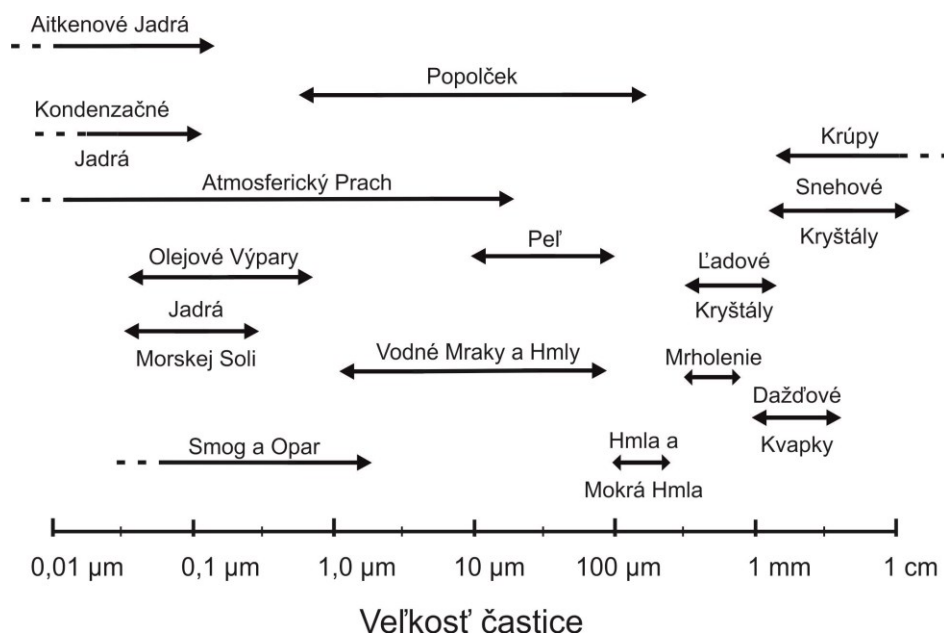
Tlak atmosféry klesá s narastajúcou výškou v dôsledku znižujúcej sa gravitácie a hydrostatickej rovnováhy tekutej atmosféry.

2.1.2 Častice obsiahnuté v štandardnej atmosfére

Optické žiarenie šíriace sa v atmosfére je ovplyvnené časticami obsiahnutými vo vzduchu. Ide napríklad o prach, hmlu, opar, kvapôčky oblakov a aerosólov. Obrázok č. 2.3 uvádza základnú charakteristiku častíc atmosféry vzhľadom k nadmorskej výške. Obrázok č. 2.4 označuje približnú veľkosť bežných atmosférických častíc.



Obrázok 2.3: Fyzická charakteristika častíc atmosférických aerosólov



Obrázok 2.4: Približná veľkosť atmosférických častí

Aerosóly v hraničnej vrstve atmosféry (1-2 km nad zemským povrchom) sú lokálne emitované, prinášané vetrom a majú najväčšiu variabilitu, zloženie a koncentráciu. Aerosóly nad zemským povrchom sú zväčša pôdne častice, prach a organické častice z vegetácie. Nad oceánom to sú po väčšine častice soli.

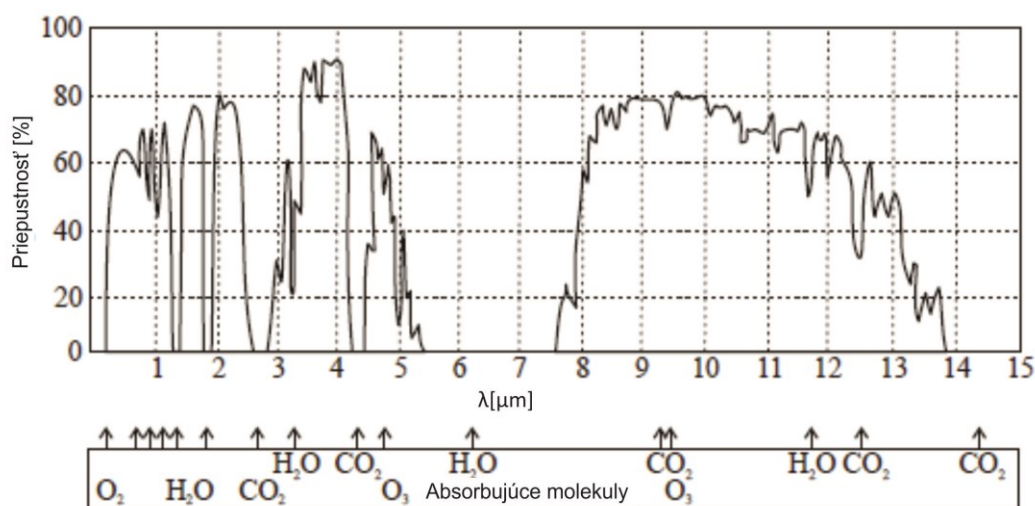
Vzhľadom na globálne vetry musíme počítať s veľkým prenosom týchto častíc cez kontinenty a oceány, najmä častice spojené napríklad s prašnými búrkami. Vzhľadom na tieto skutočnosti dochádza k zmiešaniu rôznych druhov častíc.

V troposfére nad hraničnou vrstvou je kompozícia častíc menej závislá od lokálnych podmienok povrchu. Naopak je viac pozorovateľný výskyt globálne distribuovaných častíc. Aerosóly pozorované v troposfére sú v nej väčšinou kvôli koagulácii plyných látok a jemného prachu.

Nad troposférou v oblasti 10 až 30 km nad zemským povrchom už je možné pozorovať rovnomerné zmiešanie globálnych častíc po celom svete.

2.2 Spektrálna závislosť a priepustnosť atmosféry

Najnákladnejším optickým javom atmosféry je absorpcia svetla, ktorá je silne spektrálne závislá. Môžeme ju popísať percentuálne pomocou priepustnosti atmosféry. Silná spektrálna závislosť tohto javu je spôsobená vlastnou absorpciou molekúl plynov v nej obsiahnutých. Na obrázku č. 2.5 môžeme vidieť graf priepustnosti atmosféry s vyznačením, ktoré molekuly plynov obmedzujú priepustnosť svetla svojou absorpciou.



Obrázok 2.5: *Priepustnosť atmosféry* [4]

2.3 Javy vznikajúce počas šírenia optického zväzku

Mechanické pôsobenie alebo aj teplotný gradient APP spôsobujú, že lokálna teplota a tlak ovzdušia sa mení nielen v priestore ale aj v čase (ako bolo spomenuté v podkapitole 2.1). Dôsledkom týchto skutočností je, že index lomu APP sa stáva náhodnou funkciou súradníc času a priestoru. Každý optický zväzok, ktorý prechádza takýmto prostredím podlieha energetickým aj tvarovým zmenám. Zmeny tvaru týchto zväzkov ako napríklad jeho rozšírenie alebo odklon, môžu vyvolať zmeny úrovne prijímaného výkonu.

Ku hlavným optickým javom vznikajúcim behom šírenia zväzku je Extinkcia (zoslabenie) optickej intenzity, Turbulencie optickej intenzity a krátkodobé prerušovanie

zvázku. Pri týchto javoch je potrebné byť vedomý ich spoločného pôsobenia. Fluktuácie optickej intenzity vyvolávajú súčasne intenzitnú extinkciu.

Z pohľadu šírenia samostatného monochromatického zväzku svetla v atmosfére najviac vplyvajú javy zvané absorpcia, rozptyl a turbulencia. Lineárny prenos, respektíve absorpcia, tohto svetla môže byť vyjadrená Beer-Lambertovým zákonom. Jeho zjednodušený tvar je možné vyjadriť ako

$$I_x(\lambda, t', x) = I_0(\lambda, t, 0) \exp - \alpha_e(\lambda)x, \quad (2.1)$$

kde $I_x(\lambda, t', x)$ je intenzita optického zväzku po prechodu cez trasu dĺžky x , $\alpha_e(\lambda)$ je extinkčný koeficient respektíve koeficient útlmu, λ je vlnová dĺžka monochromatického svetla a parameter t' vyjadruje priestorovú a časovú zmenu koncentrácie častíc spôsobujúcich útlm.

Celkový extinkčný koeficient je možné vyjadriť súčtom koeficientov opisujúcich ostatné javy. Tieto javy pôsobia na extinkciu optického zväzku. Lineárna absorpcia, Rayleighov a Mieov rozptyl sa najviac prejavujú v atmosfére. Celkový koeficient extinkcie $\alpha_e(\lambda)$ [m^{-1}] je daný rovnicou

$$\alpha_e(\lambda) = \alpha_a(\lambda) + \alpha_R(\lambda) + \alpha_M(\lambda), \quad (2.2)$$

kde jednotlivé zložky reprezentujú absorpciu, Rayleighov rozptyl a Mieov rozptyl.

2.3.1 Extinkcia optickej intenzity

Extinkciu, alebo taktiež zoslabenie, optickej intenzity môžeme rozdeľovať podľa toho akým vplyvom vzniká. Jedným z hlavných vplyvov je turbulencia atmosféry. Ďalšími môžu byť absorpcie, rozptyl. Rozptyl môže vznikať na molekulách alebo na aerosóloch. Všetky tieto vplyvy môžu extinkciu ovplyvňovať súčasne.

Ako bolo spomínané o podkapitole vyššie vplyv javov na zväzok monochromatického svetla môžeme vyjadriť pomocou extinkčného koeficientu. Optický zväzok, ktorý prechádza atmosférou je najviac ovplyvňovaný hmlou. Je tomu tak preto, že priemer kvapôčok hmly sa dá porovnať s vlnovou dĺžkou svetla, čo je hlavným dôvodom, prečo hmla spôsobuje najväčší útlm.

Extinkčný koeficient sa dá ale vyjadriť pomocou meteorologickej viditeľnosti V_M . Tá je definovaná ako vzdialenosť v atmosfére, ktorej priepustnosť $T = 2\%$ (0,02) pri vlnovej dĺžke 550 nm. Vzťah medzi α_e [km^{-1}] a V_M je

$$\alpha_e(\lambda) = \frac{3,91}{V_M} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-q}, \quad (2.3)$$

kde λ je vlnová dĺžka svetelného zväzku, parameter q je určený podľa empirických modelov.

Kruseho a Kimov empirický model v závislosti na meteorologickej viditeľnosti definujú parameter q použitý v rovnici vyššie. Tieto dva modely sú vyjadrené v tabuľkách č. 2.2 a č. 2.3.

Používajú sa hlavne pre stanovenie útlmu svetla prechádzajúceho hmlou. Ten je možné vypočítať z koeficientu extinkcie pomocou vzťahu

$$\alpha(\lambda) = \frac{\alpha_e(\lambda)}{0,23}, \quad (2.4)$$

kde α je koeficient útlmu v $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$, α_e je koeficient extinkcie.

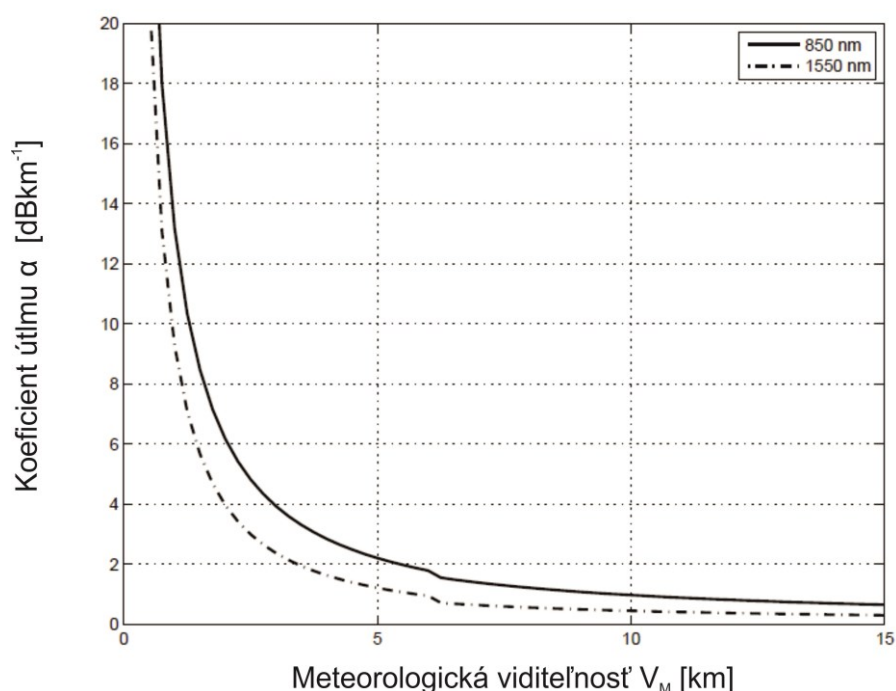
Meteorologická viditeľnosť	Parameter q
$V_M > 50 \text{ km}$	1,6
$6 \text{ km} < V_M < 50 \text{ km}$	1,3
$V_M < 6 \text{ km}$	$0,585 \cdot V_M^{1/3}$

Tabuľka 2.2: *Kruskeho model*

Meteorologická viditeľnosť	Parameter q
$V_M > 50 \text{ km}$	1,6
$6 \text{ km} < V_M < 50 \text{ km}$	1,3
$1 \text{ km} < V_M < 6 \text{ km}$	$0,16 \cdot V_M + 0,34$
$0,5 \text{ km} < V_M < 1 \text{ km}$	$V_M - 0,5$
$V_M < 0,5 \text{ km}$	0

Tabuľka 2.3: *Kimov model*

Na základe rovníc č. 2.3 a č. 2.4 bola vypočítaná závislosť koeficientu útlmu na meteorologickej viditeľnosti. Obrázok 2.6 uvádza túto závislosť pre vlnové dĺžky 850 nm a 1550 nm. Parameter q bol vypočítaný podľa Kruskovho modelu (tab. č. 2.2).



Obrázok 2.6: Závislosť koeficientu útlmu a meteorologickej viditeľnosti [4]

2.3.2 Turbulencia optickej intenzity

Turbulenciu optickej intenzity môžeme rozdeliť na tri typy. Fluktuáciu optickej intenzity spôsobenú vplyvom turbulencie troposféry, vplyvom deformácie tvaru zväzku alebo pôsobením dažďa či snehu. Najznámejšie prejavy účinkov turbulencie je blikanie hviezd a vlnenie horizontu počas horúceho dňa. Prvý z týchto efektov je náhodné fluktuácie amplitúdy svetla. Druhým je náhodné vychýľovanie zväzku, ktorý vedie k zníženiu rozlíšenia obrazu. Medzi ostatné účinky patrí rozširovanie optického lúča.

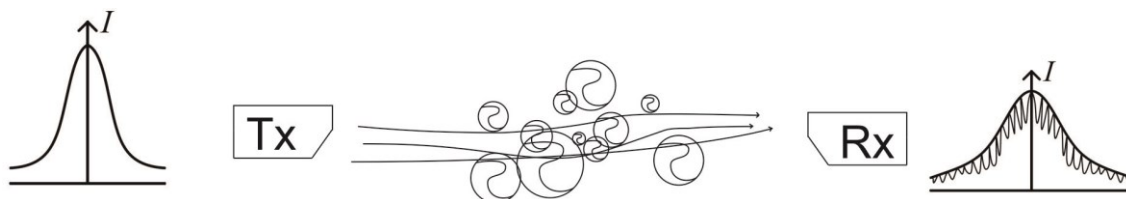
Vďaka premenlivej rýchlosti prúdenia vetru a termálnym zmenám vzniká v atmosfére prúdenie. Prúdenie plynov vychádza z prúdenia kvapalín. Delí sa na laminárne a turbulentné. V prípade laminárneho prúdenia sa prúdnice medzi sebou nemiešajú a prúdia rovnobežne so smerom šírenia.

U turbulentného prúdenia prúdnice vytvárajú nepredvídateľné zmeny (fluktuácie) premenných veličín prúdenia. Atmosférické turbulencie vytvárajú fluktuácie teploty, hustoty, rýchlosti prúdenia a iných vlastností. Spolu s nimi sa náhodou veličinou priestoru a času stáva aj index lomu. Optický zväzok prechádzajúci takýmto prostredím je vystavený nežiaducim vplyvom ako zmeny smeru šírenia, fluktuácie intenzity a podobne.

Fluktuácia intenzity je vyjadrená relatívnou variáciou optickej intenzity σ_I^2 prijímaného signálu. Je to podiel rozdielu strednej hodnoty kvadrátu prijímanej intenzity voči kvadrátu strednej hodnoty prijímanej intenzity delené kvadrátom strednej hodnoty prijímanej intenzity

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1. \quad (2.5)$$

Spôsobom akým môže ovplyvniť profil Gaussovho zväzku prechodom cez turbulentné prostredie je znázornené na obrázku č. 2.7.



Obrázok 2.7: Fluktuácia intenzity Gaussovho zväzku na detektore prijímača

Refrakčná turbulencia v atmosfére môže byť charakterizovaná tromi parametrami. Vonkajšia stupnica S_0 je dĺžka rozmerovo najväčších turbulentných vírov. Vnútorná stupnica s_0 je naopak dĺžkou najmenších vírov. Za predpokladu inerciálneho rozsahu (veľkosť medzi vonkajšou a vnútornou stupnicou), sú fluktuácie indexu lomu najlepšie popísané štruktúrnou funkciou

$$D_n(r_1, r_2) = \{[n(b_1) - n(b_2)]^2\}, \quad (2.6)$$

kde $n(b_i)$ je index lomu v dobe b_i a lomené zátvorky označujú súbor priemeru. Pre homogénne a izotropné turbulencie záleží len na vzdialenosti medzi dvomi bodmi b . Tie sú dané vzťahom:

$$D_n(r) = C_n^2 r^{\frac{2}{3}}, \quad (2.7)$$

kde C_n je miera sily turbulencie, ktorá je definovaná touto rovnicou.

Prvý efekt refrakčných turbulencií, ktorý stojí za zváženie je vychýľovanie optického zväzku v atmosfére. Rozdiely umiestnenia centru zväzku z pohľadu dvoch kolmých osí je nezávislý od Gaussovho rozloženia náhodnej veličiny. Toto vychýľovanie je všeobecne charakterizované štatisticky rozptylom uhlového posunutia.

Ďalším efektom refrakčnej turbulencie je rozširovanie optického zväzku počas jeho prechodom atmosférou. Jestvujú dva typy rozširovania zväzku a to krátkodobé a dlhodobé. Dlhodobé rozšírenie je definované ako turbulentne rozšírený zväzok pozorovaný počas dlhej doby. Obsahuje tiež efekt pomalého vychýľovania celého zväzku.

Krátkodobé rozširovanie zväzku je rozšírenie pozorované v určitom okamihu. Nezáhŕňa v sebe vychýlenie zväzku a je často určený dlhodobým rozšírením zväzku, ktoré nezáhŕňa vychýlenie tohto zväzku, aj keď oba nie sú totožné.

Môžeme uvažovať, že vychýlenie zväzku je spôsobené turbulentnými vírmi väčšími, než je samotný optický zväzok. Krátkodobé rozšírenie zväzku je spôsobené turbulentnými vírmi

menšími, než je optický zväzok. Existuje viac menších vírov, ktoré spôsobujú rozširovanie zväzku, v takom prípade je rozšírenie priemerom pôsobenie menších vírov.

Fluktuácie krátkodobého rozšírenia sú omnoho menšie, než tie spôsobené vychýlením. V dôsledku toho sú typicky zanedbávané. Primárnym efektom krátkodobého rozšírenia zväzku je rozptýlenie priemernej energie zväzku na väčšiu plochu. To znamená, že priemerná hodnota ožiarenia na osi sa znižuje, a priemerná hodnota ožiarenia pri veľkom náklone sa zvyšuje.

V hraničnej vrstve atmosféry (najnižších pár sto metrov atmosféry), sú turbulencie generované žiarivým ohrevom a ochladzovaním povrchu zeme. Počas dňa povrch zeme ohrieva vzduch, ktorý sa zmiešava s studeným vzduchom. Počas noci je zem ochladzovaná a studenší vzduch sa zmiešava s teplým vzduchom. Doba extrémne nízkych turbulencií existuje na úsvite alebo za súmraku, kedy nie je teplotný gradient v nižších vrstvách atmosféry. Hladiny turbulencie sú tiež veľmi nízke ak je zamračená obloha a solárne ohrievanie a chladenie je nízke. V určitých prípadoch sila turbulencie môže byť predpovedaná z meteorologických parametrov a charakteristík povrchu pod hraničnou vrstvou.

Turbulencie sú ale závislé od výšky. Čím viac stúpa výška atmosféry, tým slabšie turbulencie sa v nej vyskytujú. A to do výšky 3 až 5 km. Úroveň turbulencií po tejto výške narastá na maximum pri úrovni tropopauzy (10 km). V úrovniach nad tropopauzou turbulencie rapidne klesajú.

Model profilov turbulencie sa vyvinul z tohto typu meraní. Zrejme najlepši dostupný model pre úrovne od 3 do 20 km je Hufnagelov model:

$$C_n^2 = \left\{ \left[(2,2 \cdot 10^{-53}) a^{10} \left(\frac{W}{27} \right)^2 \right] \exp \left(-\frac{a}{1000} \right) + 10^{-16} \exp \left(-\frac{a}{1500} \right) \right\} \exp[u(a, t)], \quad (2.8)$$

kde a je nadmorská výška v metroch, W je vertikálny priemer druhej mocniny rýchlosti vetra, a u je náhodná premenná, ktorá umožňuje modelovať náhodné vplyvy prírody. W je definované ako:

$$W^2 = \frac{1}{1500} \int_{5000}^{20000} v^2(a) da, \quad (2.9)$$

kde $v(a)$ je rýchlosť vetra vo výške a .

Pre rozšírenie modelu na úroveň zeme je nutné pridať závislosť povrchovej vrstvy zeme. Ďalším pokusom o rozšírenie tohto modelu je Hufnagel-Valleyho model:

$$C_n^2 = 0,00594 \left(\frac{W}{27} \right)^2 (a \cdot 10^{-5})^{10} \exp \left(-\frac{a}{1000} \right) + 2,7 \cdot 10^{-16} \exp \left(-\frac{a}{1500} \right) + A \exp[u(h, t)], \quad (2.10)$$

kde W je zvyčajne nastavené na hodnotu 21 a A na $1,7 \cdot 10^{-14}$ ako funkcia náhodnej premennej.

Aj keď tento model nie je až tak presný v blízkosti zeme, má výhodu, že momenty profilu turbulencií dôležité pre propagáciu môžu byť vyhodnotené analyticky.

3 Optické zdroje a detektory pre AOS

Všeobecne sa AOS skladá z troch častí, vysielateľ, prenosové prostredie a prijímač. Táto kapitola sa venuje optickým zdrojom a detektorom pre AOS, ktoré sú nevyhnutnou súčasťou prijímačov a vysielateľov. V podkapitolách nájdeme popis najpoužívanejších zdrojov a detektorov.

Hlavnou úlohou vysielateľa je premeniť elektrický signál na optický signál vhodný pre prenos. Skladá sa z dvoch hlavných častí, konkrétne riadiacich obvodov a obvodov rozhraní. Polovodičové LED a laserové diódy LD sú dvomi typmi zdrojov používaných v AOS vysielateľoch.

U prijímačov sa najčastejšie používajú fotodetektory PIN a lavínové fotodetektory APD. Fotodetektor je jednou z dvoch častí prijímača. Druhou časťou sú obvody pre úpravu a spracovanie signálu. Úlohou prijímača je získaný optický signál previesť na elektrický a pomocou obvodov pre úpravu signálu dosiahnuť rovnaký signál, ktorý vyslal vysielateľ.

3.1 Optické zdroje

Ako bolo spomínané vyššie najpoužívanejšie optické zdroje AOS sú LED a LD. U zdrojov sa kladú nároky na výstupné vlastnosti a charakteristiky zdroja. Pre AOS je potrebné vytvoriť optimálny zväzok vhodný pre prenos daným prostredím. Musí mať nielen dostatočnú intenzitu, monochromatickosť ale musí byť vysielaný aj pod vhodným uhlom. Zdroj musí mať tiež väčšiu frekvenčnú odozvu než frekvenciu vstupného signálu aby bolo možné použiť moduláciu.

3.1.1 Luminiscenčné diódy

LED emitujú svetlo na princípe elektroluminiscencie. Sú tvorené silne dotovaným prechodom PN, v na ktorom dochádza v priepustnej polarizácii k injekcií minoritných nosičov náboja. U LED sa jedná o spontánnu z časti žiarivú rekombináciu tohto páru pri ktorej dochádza k emisii fotónu. Tento typ emisie sa tiež označuje ako spontánna emisia žiarenia o vlnovej dĺžke:

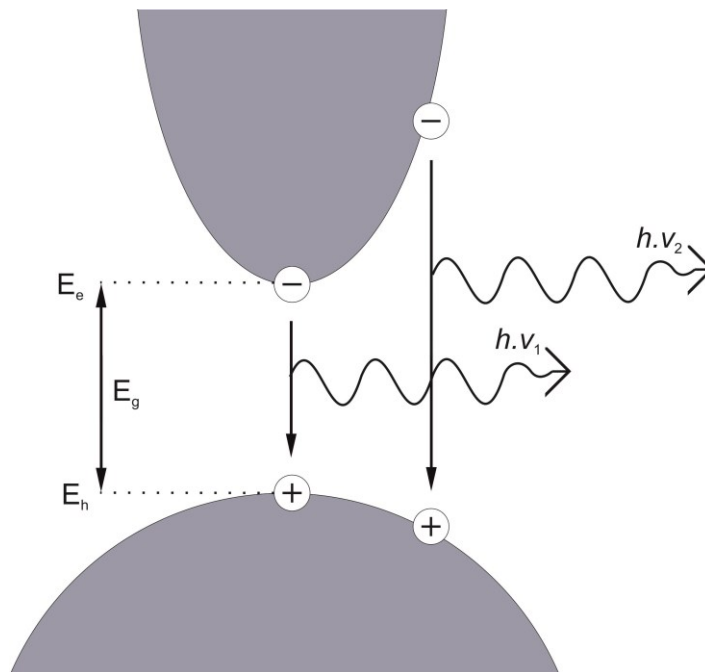
$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_g} \quad (3.1)$$

Schematický znázornený proces rekombinácie je na obrázku 3.1. Môžeme na ňom vidieť parabolicky rozložené diery vo valenčnom pásme a rovnako rozložené elektróny vo vodiacom pásme. Vďaka zákonu zachovania energie môžeme tvrdiť, že rozdiel energie elektrónu E_e a energiou diery E_h určuje energiu vyžiareného fotónu.

$$h \cdot \nu = E_e - E_h \approx E_g, \quad (3.2)$$

kde h je Planckova konštanta a ν je frekvencia žiarenia.

To znamená, že energia fotónu je podobná energií zakázaného pásu E_g , v prípade, že tepelná energia je oproti tejto energií zanedbateľná. Vďaka tomu môžeme pomocou výberu vhodného materiálu s vhodnou energiou zakázaného pásu získať požadovanú vlnovú dĺžku žiarenia.



Obrázok 3.1: Rekombinácia Elektrón-diera

GaAs je materiál, ktorý má šírku zakázaného pásu 1,42 eV, čomu odpovedá vlnová dĺžka 873 nm. Toto žiarenie je však materiálom silne absorbované. Používa sa preto dotácia GaAs kremíkom vytvárajúcim akceptory a energiu 0.1 eV. Maximum vyžarovania sa potom posunie k vyšším vlnovým dĺžkam a nie je už tak silne absorbované materiálom diódy. [5]

Okrem zákona zachovania energie sa uplatňuje aj zákon zachovania hybnosti. Pre polovodiče s priamymi prechodmi zákon hovorí, že hybnosť nosičov pred interakciou je rovnaká ako hybnosť nosičov po nej.

Pri pohľade na hybnosť nosičov a hybnosť fotónov si môžeme všimnúť, že hybnosť nosiča je o niekoľko rádov vyššia než hybnosť fotónov. Preto sa hybnosť elektrónov nemôže výrazne meniť behom prechodu z vodivého do valenčného pásu. To je hlavným dôvodom prečo je tento prechod vertikálny, ako ukazuje obrázok 3.1.

U týchto polovodičov musí byť splnená podmienka, aby hybnosti elektrónu a diery bola rovnaká.

U nepriamych prechodov nie je splnené pravidlo zachovania hybnosti. Aby pri takomto prechode bol vyžiarený fotón využíva sa účasť fonónu, ktorý môžeme považovať za kmity krištáľovej mriežky. Ten má malú energiu ale má relatívne veľkú hybnosť a v konečnom dôsledku je jeho pôsobením hybnosť zachovaná. Nepriame prechody ale majú malú

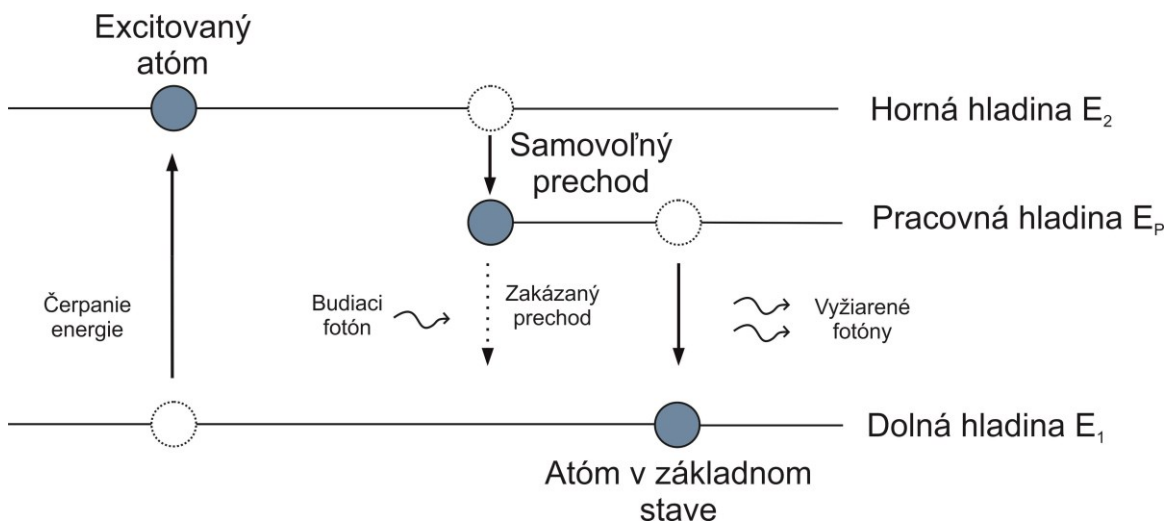
pravdepodobnosť, pretože aby došlo k emisií je nutná účasť všetkých spomínaných troch častíc (elektrón, fotón, fonón).

LED môžu dosiahnuť maximálnu modulačnú rýchlosť 1 Gb/s, a to vďaka dobe života spontánnych nosičov v LED, ktorá je rádovo od 1 ns do 100 ns. Doba je závislá od koncentrácie dopovania aktívnej oblasti a kvality materiálu.

3.1.2 Laserové diódy

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) pracujú na princípe zosilnenia svetla pomocou stimulovanej emisie. Žiarivá rekombinácia u nich, na rozdiel od LED, pracuje na princípe stimulovanej emisie. Stimulovaná emisia je v podstate žiarivá rekombinácia indukovaná pomocou už prítomného žiarenia. Vďaka tomu má vzniknuté žiarenie rovnakú vlnovú dĺžku, smer, polarizáciu a fázu ako žiarenie indukujúce. Laserový zväzok má výborné vlastnosti. Je kolimovaný, čo znamená, že sa nerozbieha. Monochromatický, teda, že všetky fotóny majú rovnakú vlnovú dĺžku. Je tiež koherentný, teda jeho fotóny majú rovnakú časovú aj priestorovú fázu.

K stimulovanej emisií je tiež potrebné zaistiť látku s inverznou populáciou. Čo je dostatočné množstvo nadbytočných nosičov. S tým súvisí prahový prúd, ktorý je dôležitým parametrom polovodičových laserov. Vďaka minimálnej hodnote pretekajúceho prúdu v priepustnom smere je možné začať proces stimulovanej emisie.



Obrázok 3.2: Stimulovaná emisia v trojhľadínovom systéme

Na obrázku 3.2 je vyobrazená činnosť stimulovanej emisie. Aby stimulovaná emisia mohla prebiehať je potrebné časť vznikajúceho žiarenia vracat' naspäť do oblasti, kde nastáva emisia, zvaná tiež ako aktívna oblasť. Toto zabezpečujú dve zrkadlá, ktoré spolu tvoria Fabry-Perotov rezonátor. Zrkadlá sú realizované pomocou štepných plôch na okrajoch polovodičovej štruktúry. Vo vnútri tohto rezonátoru môžu existovať módy splňujúce podmienku:

$$N \frac{\lambda}{2} = L, \quad (3.3)$$

kde L je dĺžka rezonátoru, λ vlnová dĺžka a N je prirodzené číslo. Podmienkou pre vznik laserového žiarenia je prevaha optického zisku v rezonátore nad optickými stratami.

V ňom potom budiaci fotón spôsobí lavínovú reakciu odrážaním od zrkadiel. Vybudené fotóny sa odrážajú čím spôsobia ďalšie prechody a vyžiarenie ďalších fotónov. Ich počet tak rapídne narastá.

Na obrázku 3.2 je vyobrazený trojhladinový systém. V praxi použiteľný laser musí mať aspoň trojhladinový systém. Bežne sa vyskytujú aj lasery s štvorhladinovým systémom. Je tomu tak preto, že pre väčší výkon laseru je potrebný väčší výkon budiacej vlny. Ak ale intenzita budiacej vlny narastá spôsobí to, že počet častíc na oboch stranách (vodivej aj valenčnej vrstvy) vyrovnáva. Kvôli tomu nenastane inverzná populácia.

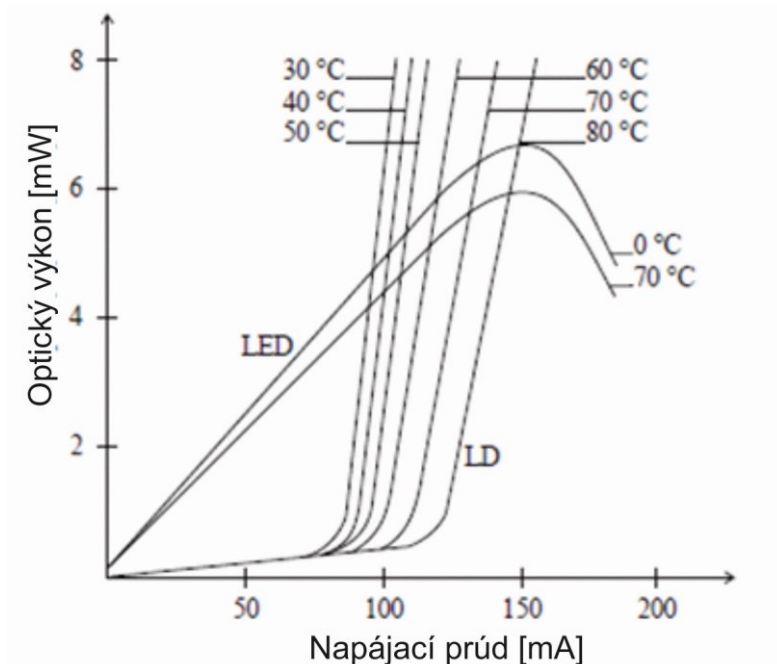
Trojhladinový systém využíva princípu zakázaných samovoľných prechodov medzi niektorými hladinami materiálu. Dôvodom je nepovoláná zmena kvantových čísel. Nosiče sú čerpané na vyššiu hladinu, z ktorej samovoľne prejdú na hladinu nižšiu. Tento prechod je dostatočne rýchly a nežiarivý. Laser potom pracuje len medzi hladinami s zakázaným prechodom a emisia fotónu je možná len vďaka interakciám s budiacim fotónom.

Jestvuje viac druhov laserov. Môžeme ich deliť podľa viacerých požiadaviek. Napríklad podľa aktívneho prostredia, úrovne výkonu, vyžarovanej vlnovej dĺžky, pracovného režimu alebo podľa druhu budenia.

3.1.3 Porovnanie LED a LD

LED a LD sú zrovnateľné v mnohých parametroch a vlastnostiach. Najzakladanejšie rozdiely nájdeme už pri vyžarovanom svetle. Hlavným z rozdielov je typ používaných svetelných emisií, ktoré určujú rozdiely medzi mnohými parametrami svetla pochádzajúceho z LD a LED. Napríklad jedným z nich je šírka spektrálnej čiary, ktorá je u LED od 25 nm až po 100 nm a u LD 5 nm. Elektrooptická účinnosť je kritérium, ktoré uvádza koľko elektrickej energie je zdroj previesť na svetelnú. U LED sa účinnosť pohybuje v rozmedzí 10-20 %, LD 3-70 %. Pre tento pohľad je zaujímavá závislosť optického výkonu na napájacom prúde LED a LD vyobrazená na obrázku 3.3.

Riadiace obvody u LED stabilizujú prúd, u LD sa stabilizuje nielen prúd ale aj teplotu, z čoho vyplýva, že LED má lepšiu teplotnú stabilitu.



Obrázok 3.3: Závislosť optického výkonu na napájacom napätí LD a LED [4]

Vzhľadom na bezvláknovú komunikáciu sa pre vnútorné priestory používajú hlavne LED, LD naopak vo vonkajších priestoroch. Jedným z dôvodov prečo tomu tak je, že LED majú vyžarovacie uhly do 30° , LD rádovo v jednotkách stupňov. Vzhľadom na bezpečnosti očí sú menej nebezpečné LED, pretože vysielajú širší zväzok. Ďalším parametrom pre AOS je šírka pásma. Modulačná šírka pásma u LED je od desiatok kHz do stoviek MHz, u LD sa pohybuje od desiatok kHz až po desiatky GHz. Prenosová rýchlosť je jednoznačne vyššia u LD, kde je zdroj schopný dosiahnuť až 10 Gb/s. Prenosová rýchlosť LED je v blízkosti hodnoty 200 Mb/s.

3.2 Fotodetektory

Hlavným účelom fotodetektorov je detekovať svetelné žiarenie a prevádzať ho na elektrický signál. Ich základom je schopnosť fotónov excitovať elektróny z valenčného pásu, či z hladín vo vnútri zakázaného pásu do vodivého pásu polovodiča. Medzi polovodičové detektory patria fotoodpory, fotodiódy, fototranzistory, fototyristory a niektoré kvantovo viazané súčiastky.

V AOS sa používajú tri typy fotodetektorov: PIN fotodióda, lavínová fotodióda APD a kov-polovodič-kovová fotodióda MSM. Tieto tri typy najviac splňujú požiadavky kladené na fotodetektor. Je tomu tak preto, že AOS pracujú s obmedzeným vysielačím výkonom z dôvodu bezpečnosti ľudských očí. Signál tiež prechádza prostredím s vysokým šumom spôsobeným okolitým svetlom. Pre prijímač AOS je dôležité aby bol fotodetektor schopný prijať optické signály nízkej úrovne s čo najmenším šumom, ktorý spôsobuje nárast bitových

chyb. Vlastnosti fotodetektoru ovplyvňujú dosiahnuteľnú dĺžku AOS spoja. Najdôležitejšími požiadavkami sú:

- vysoká citlivosť používanej vlnovej dĺžky
- vysoká presnosť prevodu a reprodukcie optického signálu na elektrický
- veľká detekčná oblasť
- čo najmenšia aktívna plocha
- vysoká elektrická odozva na prijatý optický signál
- vysoká frekvenčná odozva
- krátka doba odozvy
- minimálny šum, minimálne straty a minimálny prúd a skraty
- ostatné požiadavky: nízka cena, malá veľkosť, vysoká stabilita, vysoká spoľahlivosť

K obmedzeniu šumu z okolitého svetla sú v optických prijímačoch používané optické filtre. Na fotodetektor je tiež kladená požiadavka aby mal čo najmenšiu aktívnu plochu. Naopak samotný prijímač AOS musí mať čo najväčšiu zbernú plochu. Z tohto dôvodu sa u prijímačov používajú optické koncentrátory.

Frekvenčná odozva je jedným z najdôležitejších parametrov pri výbere optických detektorov. Je to schopnosť reagovať na zmeny intenzity. Frekvenčnú odozvu limitujú tri hlavné mechanizmy:

1. Konečná difúzna doba nosičov vznikajúcich v oblasti PN. Správnou voľbou dĺžky v vyprázdnenej vrstve je možné tento efekt minimalizovať.
2. Prepínací efekt signálového prúdu s prechodovou kapacitou C_d , ktorý zvýši hornú medznú frekvenciu.
3. Konečný tranzitný čas nosičov pohybujúcich sa cez vyprázdnenú vrstvu. Čo je dôvod prečo fotodiódy pracujú s záverným napätím. To zvyšuje elektrické pole čím sa zrýchli prenos.

U detektoru je nutné stanoviť kompromis medzi kapacitou prechodu a tranzitnou dobou. Nárast tranzitnej doby spôsobí rastúce záverné napätie pomocou zväčšujúcej sa vyprázdnenej oblasti. To ale zároveň zvyšuje kapacitu prechodu. S zvýšenou kapacitou prechodu je väčšia šírka pásma, ale rastie tranzitný čas. Kompromisom je PIN dióda, ktorá ma vrstvu intristického polovodiča medzi vrstvami P a N.

3.2.1 Fotodióda PIN

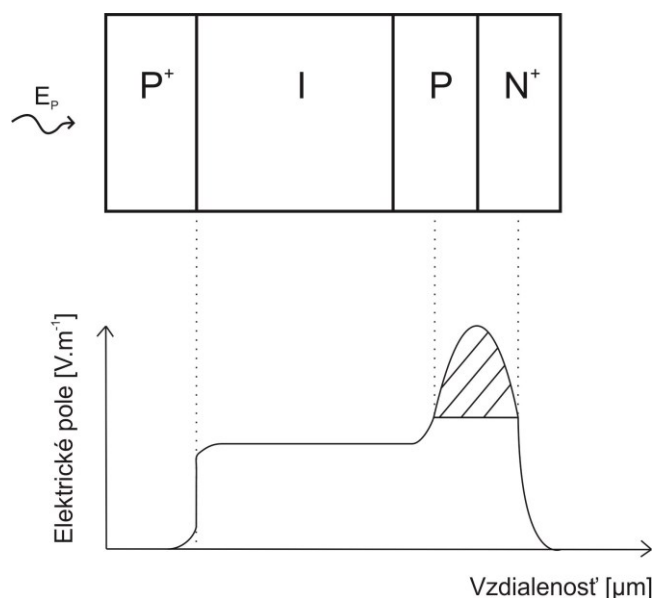
Ako už bolo spomenuté. Táto fotodióda obsahuje medzi vrstvou P^+ a N veľmi slabo dotovanú (tzv. intrinsickú) oblasť I. Vďaka tomu je rozšírená oblasť s nenulovou intenzitou elektrického poľa, čo zvyšuje citlivosť fotodetektoru. Táto štruktúra ponúka zároveň veľkú šírku vyprázdnenej oblasti. Vďaka tomu je fotodióda schopná pracovať na dlhších vlnových dĺžkach. Spôsobuje to hlbší prienik svetla do polovodiča.

3.2.2 Lavínová fotodióda (APD)

Lavínová fotodióda je zložená zo štyroch oblastí P^+NIP . Jej citlivosť je ešte vyššia než u fotodiódy PIN. Táto fotodióda je špecifická tým, že pri vyššom pracovnom napätí (desiatky až stovky voltov) je intenzita elektrického poľa na prechode P^+N dostatočná na to, aby mohlo dôjsť k lavínovému násobeniu nosičov. To znamená, že generované elektróny a diery získajú urýchlením v elektrickom poli takú kinetickú energiu, že interakciou s ďalším nosičom náboja sú schopné generovať nový pár elektrón-diera. Tento jav sa potom šíri lavínovým spôsobom.

Tento proces ale sprevádza prídavným šumom, ktorý sa pričíta k výstrelovému šumu vyvolanému generovaním nositeľov dopadajúcimi fotónmi žiarenia. Okrem šumových vlastností sa lavínový jav uskutočňuje aj na úkor teplotnej stability.

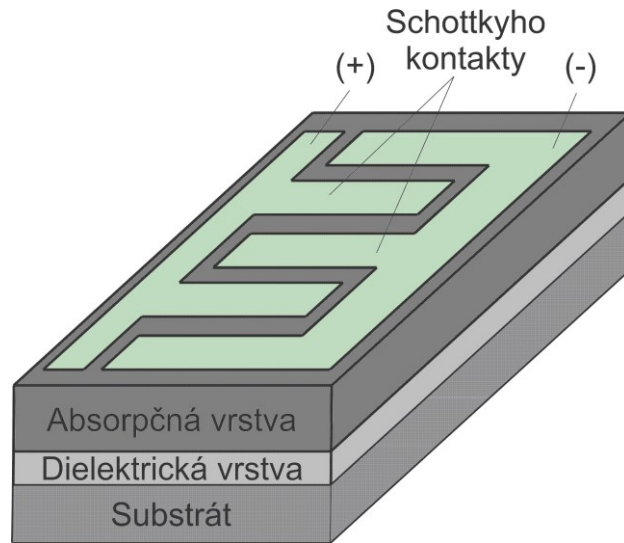
Schéma vrstiev a graf v ktorom sa prejavuje zosilnenie diódy je zobrazený na obrázku nižšie.



Obrázok 3.4: Schéma PIN diódy a jej graf intenzity elektrického poľa voči vzdialenosti

3.2.3 Fotodióda MSM

MSM fotodióda sa skladá z Schottkyho diódy s interdigitálnymi elektródami z kovu. Tie sú umiestnené na povrchu polovodiča, teda na miesto, kde dopadá svetlo. Na obrázku 3.5 môžeme vidieť schému tohto prvku.



Obrázok 3.5: *MSM fotodióda*

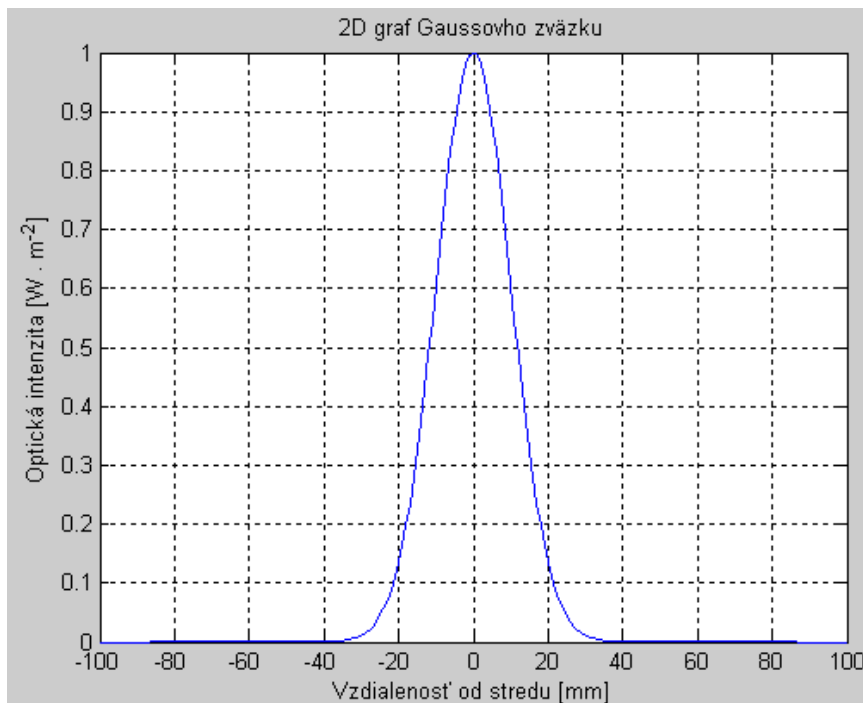
MSM fotodióda sa používa v vysokorýchlostných optoelektrických systémoch. Dlhú dobu bol výkon tejto fotodiódy horší než výkon PIN fotodiódy. Časom sa ale ukázalo že MSM fotodióda má veľkú šírku pásma, nízku kapacitanciu a krátky tranzitný čas. Potrebujú ale vysoké vonkajšie napätie. Sú drahé, no ich využitie sa našlo v systémoch, v ktorých je dôležitá výkonnosť. V porovnaní s PIN fotodiódou má MSM fotodióda vyššie zosilnenie, citlivosť, čas odozvy aj šírku pásma.

4 Svetelný zväzok

Svetlo môže mať podobu lúčov, ktoré sa nachádzajú tak blízko seba ako je to len možné. Takéto svetelné žiarenie sa môže šíriť v podobe sférickej alebo rovinnej vlny. Tieto typy vln predstavujú dva extrémny uhlového a priestorového obmedzenia zväzku. V prípade rovinnej vlny sú normály vlnoploch rovnobežne aby nedochádzalo k uhlovej divergencii. Energia sa ale u tohto zväzku rozširuje priestorovo v celej jeho oblasti.

Sférická vlna na druhej strane pochádza z jedného bodu a jeho vlnoplocha sa rozbieha do všetkých smerov. Zväzky u týchto typov vln sú divergentné. V prípade, že normály vlnoploch zvierajú malý uhol s osou šírenia x nazývajú sa ako paraximálne vlny. Jedným z najdôležitejších predstavení tejto vlny je Gaussov zväzok.

4.1 Gaussov zväzok



Obrázok 4.1: 2D Gaussov zväzok

Gaussov zväzok má radiálne symetrickú distribúciu, ktorého variácia elektrického poľa je vyjadrená rovnicou:

$$E_S = E_0 e^{\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right)}, \quad (4.1)$$

Kde E_S je elektrické pole, $r = (x_2 + y_2)/2$ je vzdialenosť príslušného bodu od osi z , E_0 je veľkosť amplitúdy poľa na ose z , ω_0 je parameter popisujúci mieru straty poľa smerom od osi z .

Jej Fourierova transformácia je tiež Gaussovou distribúciou. Ak by sme mali riešiť Fresnelov integrál namiesto použitia Fraunhoferovej aproximácie zistili by sme, že Gaussova distribúcia ostáva Gaussovou v každom bode pozdĺž cesty šírenia v optickom systéme. Vďaka tomu je možné veľmi ľahko zobrazit' rozloženie poľa v ľubovoľnom bode optickej sústavy.

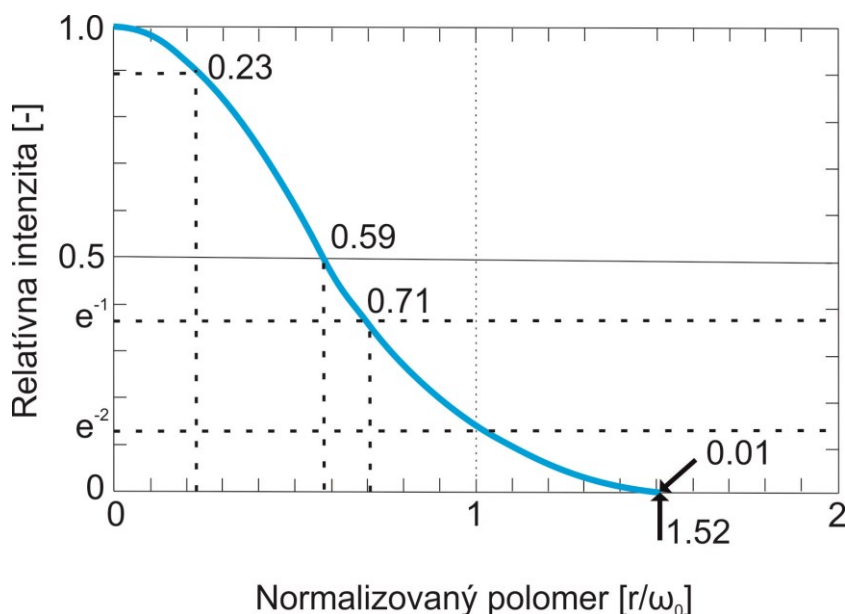
Intenzita je taktiež Gaussova:

$$I_S = \eta E_S E_S^* = \eta E_0 E_0^* e^{\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right)}, \quad (4.2)$$

kde I_S je intenzita v strede zväzku na jeho páse, konštanta η je charakteristická impedancia prostredia v ktorom prechádza zväzok, E_S je elektrické pole, E_0 je veľkosť amplitúdy poľa na ose z , ω_0 je parameter popisujúci mieru straty poľa smerom od osi z .

Tento vzťah je viac matematickou zaujímavosťou, pretože v dnešnej dobe je ľahké nájsť svetelný zdroj s Gaussovým rozložením intenzity: laser. Väčšina laserov automaticky osciluje s Gaussovým rozložením elektrického poľa.[6]

Gaussov zväzok nemá žiadne zjavné hranice pri tvorení charakteristického rozmeru ako napríklad priemer kruhového otvoru, takže jeho definícia by bola trochu subjektívna. Pre príklad je možné vidieť rozloženie Gaussovej distribúcie typického HeNe laseru na obrázku nižšie.



Obrázok 4.2: Rozloženie intenzity Gaussovho zväzku

$$I(r) = I_S e^{\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right)}, \quad (4.3)$$

kde I_S je intenzita v strede zväzku na jeho páse, r je vzdialenosť príslušného bodu od osi z , ω_0 je parameter popisujúci mieru straty poľa smerom od osi z .

Parameter ω_0 je zvyčajne charakterizuje polomer Gaussovho zväzku. Je to hodnota polomeru, ktorého intenzita klesla na $1/e^2$ alebo 0,135 jeho axiálnej alebo maximálnej hodnoty.

Ďalším zaujímavým bodom je polomer polovice maxima zväzku, alebo 50 % intenzity, čo je $0,59\omega_0$. V $2\omega_0$ alebo dvojnásobku Gaussovho polomeru je intenzita vrcholu 0,0003. Zvyčajne zanedbateľná.

$$P(r) = P(\infty) \left[1 - e^{-\left(\frac{r^2}{\omega_0^2}\right)} \right], \quad (4.4)$$

kde $P(r)$ je výkon obsiahnutý pod polomerom r , $P(r)$ je možné ľahko získať integráciou distribúcie intenzity od 0 do r , $P(\infty)$ je celkový výkon prenášaný zväzkom, r je vzdialenosť príslušného bodu od osi z , ω_0 je parameter popisujúci mieru straty poľa smerom od osi z .

Pri normalizovaní vzhľadom na celkový výkon zväzku $P(\infty)$ vo wattoch, krivka je rovnaká ako pre intenzitu, no s invertovanou koordináciou. Takmer 100 % energie je obsiahnutej v polomere $r = 2\omega_0$. Polovica energie sa nachádza v $0,59\omega_0$ a len asi 10 % výkonu je v $0,23\omega_0$, polomer pri ktorom intenzita klesla na 10 %.

Celkový výkon vo wattoch je podobný intenzite na osi $I(0)$ [W/m^2], podľa:

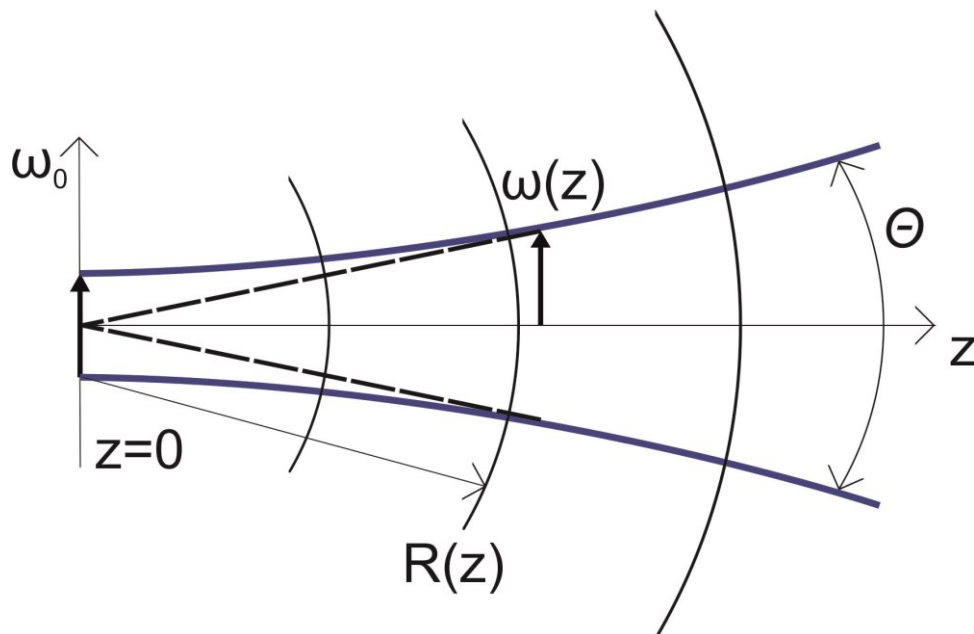
$$P(\infty) = \left(\frac{\pi\omega_0^2}{2}\right) I_s, \quad (4.5)$$

kde $P(\infty)$ je celkový výkon prenášaný zväzkom, I_s je intenzita v strede zväzku na jeho páse, ω_0 je parameter popisujúci mieru straty poľa smerom od osi z .

Intenzita na osi môže byť veľmi vysoká vzhľadom na malú plochu zväzku.

S šírením Gaussových lúčov optickým systémom je možné zaobchádzať takmer tak jednoducho ako u geometrickej optiky. Vďaka unikátnej vlastnej charakteristiky Fourierovej transformácie nie je potrebné integrály pre popis vývoja intenzity profilu voči vzdialenosti.

Ako už bolo spomínané, priečne rozdelenie intenzity ostáva Gaussové v každom mieste šírenia, mení sa len polomer Gaussovho zväzku a polomer zakrivenia. Ak si predstavíme, že nejako vytvorený lúč koherentného žiarenia s Gaussovým rozložením a planárnou vlnoplochou v pozícii $z = 0$. Veľkosť lúča a zakrivenie vlnoplochy sa líši v závislosti od z , ako je možné vidieť na obrázku nižšie.



Obrázok 4.3: Znáznornenie závislosti veľkosti lúča, zakrivenia vlnoplochy a pozície z

Veľkosť lúča sa bude zvyšovať, na začiatku pomaly, potom rýchlejšie, prípadne zvýšenie úmerne k z . Polomer krivosti vlnoplochy, ktorá bola nekonečná pri $z = 0$, bude konečná a pôvodne klesať s z . V určitom bode dosiahne minimálnu hodnotu, potom sa zvyšuje s väčšou z , až sa nakoniec stane úmerný z .

Polomer lúča $\omega(z)$ a zakrivenie vlnoplochy $R(z)$ je možné popísať rovnicami:

$$\omega^2(z) = \omega_1^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \right], \quad (4.6)$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_1^2}{\lambda z} \right)^2 \right], \quad (4.7)$$

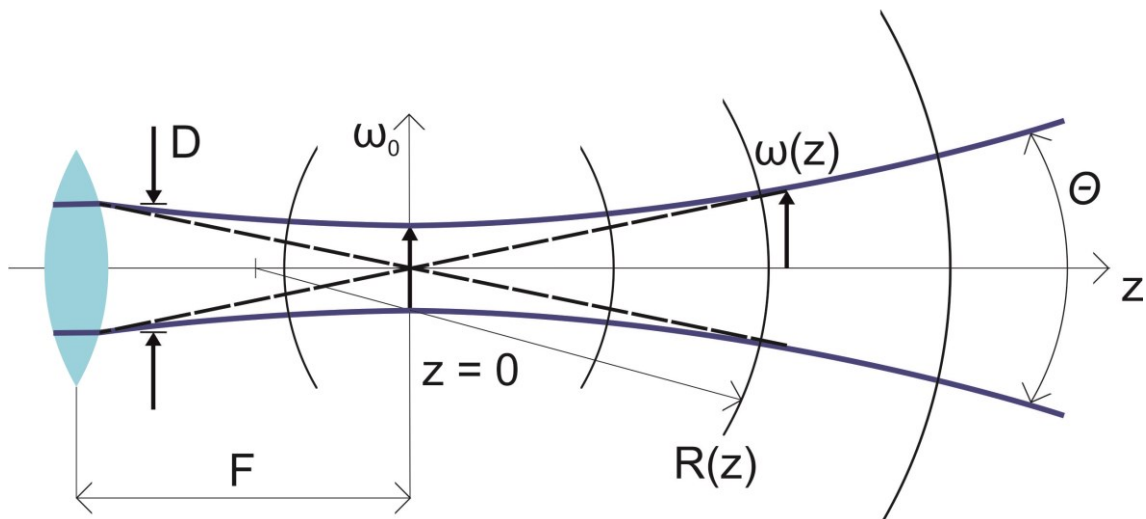
kde ω_1 je polomer zväzku v pozícii $z = 0$, λ je vlnová dĺžka, z je pozícia v osi z .

Správanie celého zväzku je špecifikované týmito dvomi parametrami. Pretože sa vyskytujú v rovnakej kombinácii v oboch rovniciach často sú zlúčené do jedného parametru z_R , Rayleighov rozsah:

$$X_R = \frac{\pi \omega_1^2}{\lambda}, \quad (4.8)$$

V skutočnosti to znamená, že v bode $z = z_R$ má svoju minimálnu hodnotu.

Môžeme si všimnúť, že táto rovnica je platná aj pre záporné hodnoty z . Len sme si predstavovali, že zdroj lúča bol pri $z = 0$. Je možné vytvoriť rovnaký zväzok pomocou väčšieho Gaussovho zväzku s negatívnym zakrivením vlnoplochy u niektorých $z < 0$. To je ľahko realizovateľné vďaka šošovke ako je vidieť na obrázku nižšie.



Obrázok 4.4: Realizácia Gaussovho zväzku pomocou šošovky a väčšieho Gaussovho zväzku s negatívnym zakrivením vlnoplochy

Vstup do objektívu je Gaussový zväzok s priemerom D a polomerom zakrivenia vlnoplochy. V prípade že budú upravovaný šošovkou bude $R(z)$ dané vzťahom vyššie (4.7) s šošovkou nachádzajúcou sa v z -páse lúča v $z = 0$. Vstupný Gaussový lúč bude mať tiež pozíciu pásu lúča a veľkosť s ním spojenú. Vďaka tomu môžeme zovšeobecniť zákon šírenia Gaussovho zväzku aj v komplikovaných optických systémoch.

Je možné ukázať, že pre elektromagnetické pole, ktorého amplitúda sa mení pomaly s rastúcou vzdialenosťou je riešením Maxwellových rovníc za počiatočnej podmienky vzťahu 4.1 vzťah:

$$E(R, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega} e^{\left(-\frac{R^2}{\omega_0^2}\right)} e^{-i\left(kz - \Phi - \frac{kR^2}{\omega_0^2}\right)} \quad (4.9)$$

Kde, $\omega(z)$ je polomer lúča definovaný vzťahom (4.6), R je zakrivenie vlnoplochy definované vzťahom (4.7),

$$\tan \Phi = \frac{2z}{D}, \quad (4.10)$$

$$D = k\omega_0^2 = \frac{2\pi}{\lambda} \omega_0^2, \quad (4.11)$$

Závislosť (4.9) sa nazýva rovnicou Gaussovho zväzku a je z nej zrejmé, že v každej rovine $z = \text{konšt.}$ Je rozdelenie amplitúdy dané opäť Gaussovou funkciou ako bolo spomínané vyššie.

4.2 Gaussove zväzky vyššieho rádu

Vyššie rády Gaussovho zväzku nemusia mať radiálne symetrickú distribúciu, ako tomu tak bolo u Gaussových zväzkov popisovaných v predošlých podkapitolách. V laserovom alebo

optickom systéme môžeme predpokladať výskyt nečistôt alebo spálených miest v častiach systému. Ich pričinením môže dôjsť k porušeniu radiálnej symetrie zväzku. Zväzok samotný potom už nemôže byť radiálne symetrický.

Výpočet elektrického poľa zväzku vykonaný v karteziánskej súradnicovej sústave potom bude nasledovný:

$$E(x, y, z) = E_{m,p} \cdot H_m\left(\frac{\sqrt{2}x}{\omega(z)}\right) H_p\left(\frac{\sqrt{2}y}{\omega(z)}\right) \cdot \frac{\omega_0}{\omega(z)} e^{\left(-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}\right)} \cdot e^{-i\left(kz - (1+m+p)\tan^{-1}\frac{z}{z_R}\right)} \cdot e^{-i\frac{kr^2}{2R(z)}}, \quad (4.12)$$

kde m a p sú dve ľubovoľné celé čísla nazývané ako čísla rádu, $E_{m,p}$ je faktor upravujúci mierku, ostatné symboly boli definované v predošlej podkapitole. Symbol $H_m(u)$ označuje Hermitov polynóm rádu m . Gaussove zväzky vyššieho rádu sú tiež označované módom $TEM_{m,p}$, kde základný mód je jednoducho označený ako $TEM_{0,0}$.

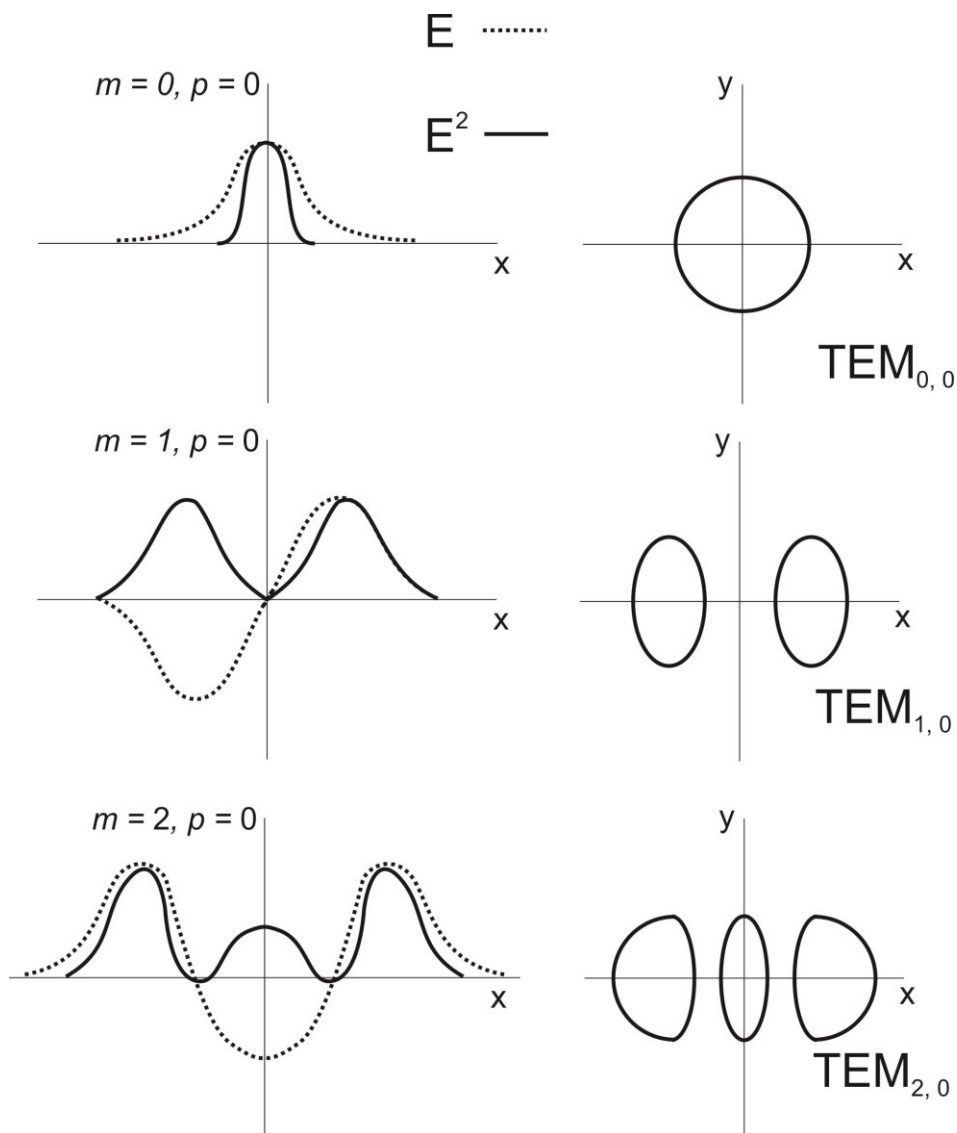
Môžeme si všimnúť mnoho podobností medzi vzťahom 4.9 a 4.12. Rovnakými sú radiálny fázový faktor, exponenciálne variácie v priečnom smere. Iba fázový posun je závislý od hodnôt p a m . Hlavnou zmena vo viditeľnom tvare je kvôli Hermitovým polynómom. Ich tvary nižších rádov sú:

$$H_0(u) = 1,$$

$$H_1(u) = 2u,$$

$$H_2(u) = 2(2u^2 - 1). [7]$$

Potom elektrické pole zväzku má väčšiu zmenu v priečnej rovine, ako je zobrazené na obrázku nižšie.

Obrázok 4.5: Elektrické pole E , intenzita E^2 a vzor jednotlivých módov

4.3 Top Hat zväzok

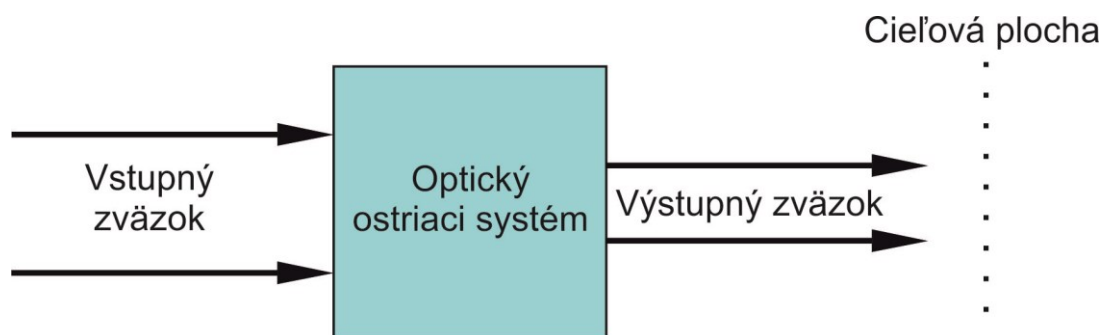
Je zväzok svetla, ktorého profil intenzity žiarenia je v ideálnom prípade vo všetkých bodoch stopy zväzku rovnaký. Najpoužívanější stopa tohto zväzku je kruhová a štvorcová. V prírode sa voľne nevyskytuje a preto je nutné ho vytvoriť. Jeho realizáciu je možné dosiahnuť vo väčšine prípadov upravením lúča Gaussovským profilom. Vďaka tejto úprave môžeme za pomoci Gaussovho zväzku a optických členov ožiarit určitú plochu rovnakou intenzitou.

Tento typ zväzku je využívaný nielen v systémoch s menším výkonom (CD, DVD, Blu-ray atd.) ale aj u vysoko výkonných laserových systémoch (napr. rezanie materiálov). Jeho využitie nájdeme ale aj v optických bezvláknových komunikáciách.



Obrázok 4.6: Dva typy Top Hat profilu [8]

4.3.1 Získanie Top Hat zväzku pomocou ostriaceho systému

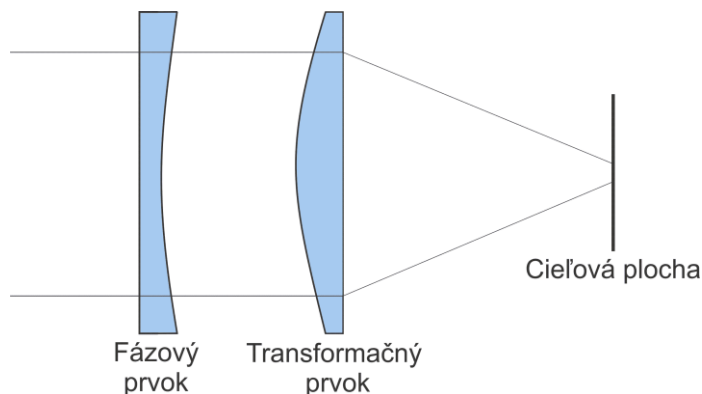


Obrázok 4.7: Schéma optického ostriaceho systému

Na obrázku vyššie je zobrazená bloková schéma ostrenia lúča. Na ľavej strane (vstupe) ostriaceho systému vstupuje do systému Gaussov zväzok podľa požadovanej tolerancie navrhnutého systému. Systém samotný má za úlohu upraviť tento zväzok tak aby odpovedal profilu Top Hat. Systém sa môže skladať z kombinácie šošoviek, optických hranolov, difrakčných členov, zrkadiel atd.

Najjednoduchší spôsob, ako získať spomínaný profil zväzku je pomocou priestorového obmedzenia. V tomto prípade sa Gaussov zväzok obmedzí len na jeho stred, konkrétne na miesto, kde je jeho časť najrovnejšia a prepustí sa len táto časť zväzku.

Ďalší z prístupov realizácie systému je predpokladať optickú konfiguráciu, ktorá je v danej aplikácii požadovaná a vytvoriť riešenie pre túto konfiguráciu. Jedným z príkladov takejto realizácie môže byť riešenie pomocou jedného prvku difrakčnej optiky. Obecnější popis tohto prístupu je získať všeobecné riešenie pre funkciu tvarovania amplitúdy a fázy s využitím teórie difrakcie a potom vytvoriť optický prvok, ktorý bude tento návrh realizovať. Tento prístup je ale spravidla veľmi obťažný a riešenie, ktoré je realizovateľné jedným prvkom je možné realizovateľné aj väčším množstvom prvkov. V tomto prípade je realizácia viac univerzálna, praktickejšia a lacnejšia.

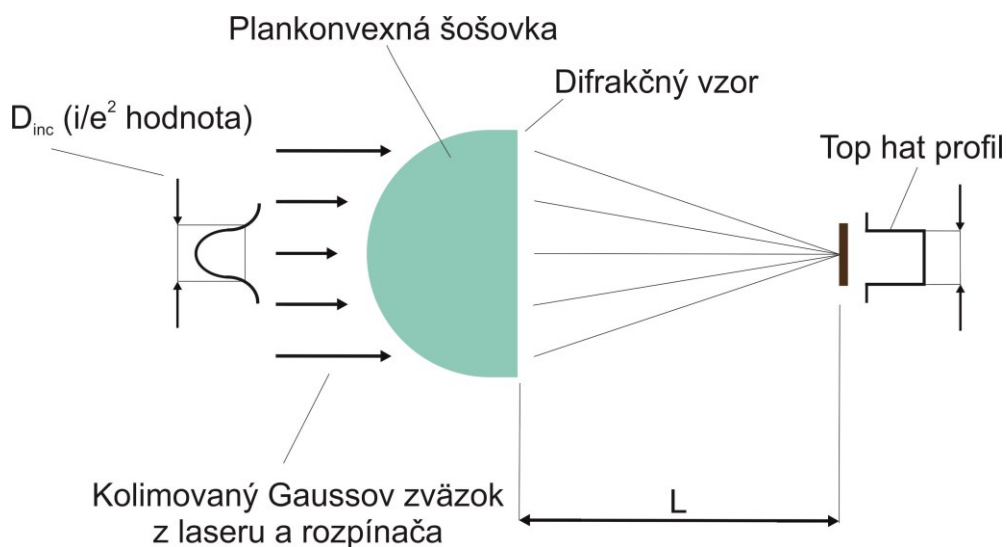


Obrázok 4.8: Realizácia ostriaceho systému pomocou Fázového a Transformačného prvku

Príkladom tohto prístupu je na obrázku 4.8. Skladá sa z fázového prvku použitého v spojení s Fourierovou transformáciou optickej šošovky. Optické pole v ohniskovej rovine transformačnej šošovky je úmerná Fourierovej transformácií produktu vstupného optického poľa a fáze fázového prvku. Takéto usporiadanie má niekoľko výhod. Zmenou fázového prvku môžeme meniť rozsah a tvar výstupného žiarenia.

Zmenou transformačnej šošovky môžeme upraviť pracovnú vzdialenosť s príslušnou zmenou rozsahu výstupu. Aj napriek tomu, že je možné navrhnuť celý tento systém jedným prvkom je jednoduchšie nechať tieto prvky a ich funkcie oddelene.[9]

4.3.2 Získanie Top Hat zväzku pomocou plankonvexnej šošovky



Obrázok 4.9: Spôsob získania Top Hat zväzku z Gaussovho zväzku pomocou upravenej Plankonvexnej šošovky (tvarovač)

Najzakladanejší spôsob získania Top Hat zväzku sa skladá zo zdroja, plankovnexnej šošovky a povrchu zamerania. Táto šošovka je fázový prvok, ktorý transformuje Gaussov vstupný lúč na Top Hat zväzok do určitého miesta. Na jej zvislej časti povrchu je zvyčajne vytvorená difrakčná štruktúra.

Každý takýto tvarovač zväzku je určený pre konkrétne použitie s unikátnym súborom optických parametrov systému ako je: vlnová dĺžka, vstupná veľkosť zväzku, pracovná vzdialenosť. Zmena niektorých z hodnôt týchto parametrov zhorší výkon tvarujúceho prvku prípadne sa stane nepoužiteľným.

Pre kvalitný prvok by mal byť použitý laser s jedným lúčom (single mode). Priemer zväzku tohto lúča v obrázku označená ako D_{inc} by mala byť na úrovni $1/e^2$ alebo 13 % intenzity normalizovanej na maximálnu intenzitu (nie celkový výkon). Je vhodné čo najpresnejšie dodržať podmienky pre parametre svetelného zväzku, ako bolo spomínané vyššie. Vďaka nim sme schopný získať optimálny homogénny Top Hat zväzok s ostrými hranami. Tento profil je taktiež závislý od x/y polohy zväzku dopadajúceho na šošovku. Dôsledkom nesprávneho zamerania môže byť výsledný profil deformovaný.

Pracovná vzdialenosť L , je naopak parameter, ktorý musí dodržať tvarovač. Kvalitný Top Hat profil je dosiahnuteľný len na pracovnej ploche v určitej vzdialenosti. Vzdialenosť L sa meria od rovinného povrchu šošovky. Tá je špecifická, pre každý typ tvarovača.

Ak by sa pracovná plocha nachádzala v vzdialenosti $< L$ intenzita zväzku by na okrajoch klesla a narástla v strede. Lúč by sa teda viac podobal profilom na Gaussov zväzok. V prípade, že by bola pracovná plocha umiestnená v vzdialenosti $> L$ profil zväzku by bol zdeformovaný opačne. Teda intenzita by narástla na okrajoch zachyteného zväzku.

5 Modelovanie rozloženia optickej intenzity

Kapitola sa zaoberá modelovaním rozloženia optickej intenzity v rôznych rovinách kolmých na osu vysielaného zväzku. Výstupom modelovania sú okrem týchto dvojrozmerných grafov aj trojrozmerné grafy daných zväzkov. Použitý bol program Matlab R2014a. V ňom boli vytvorené dva skriptovacie súbory pre vytvorenie modelov rozloženia optickej intenzity Gaussovho a Top Hat zväzku.

5.1 Rozloženie optickej intenzity Gaussovho zväzku

Modelovanie optickej intenzity tohto typu zväzku vykonáva skriptovací súbor Gauss.m. Nachádza sa v elektronickej prílohe v priečinku s názvom Modelovanie. Okrem toho jeho text je možné nájsť v prílohe A.

Rozloženie optickej intenzity Gaussovho zväzku je daný vzťahom 5.1

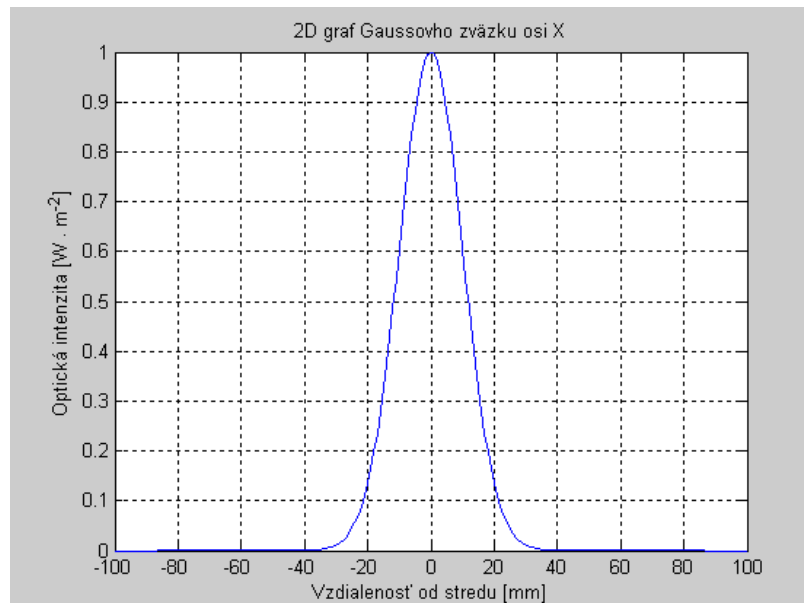
$$I = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-2 \cdot x^2}{w_x^2} \cdot \frac{-2 \cdot y^2}{w_y^2}\right), \quad (5.1)$$

kde I je výsledná optická intenzita, I_0 je optická intenzita v strede zväzku, w_x je polo šírka zväzku z pohľadu osi X , w_y je polo šírka zväzku z pohľadu osi Y . X a Y sú hodnoty vzdialenosti od stredu zväzku.

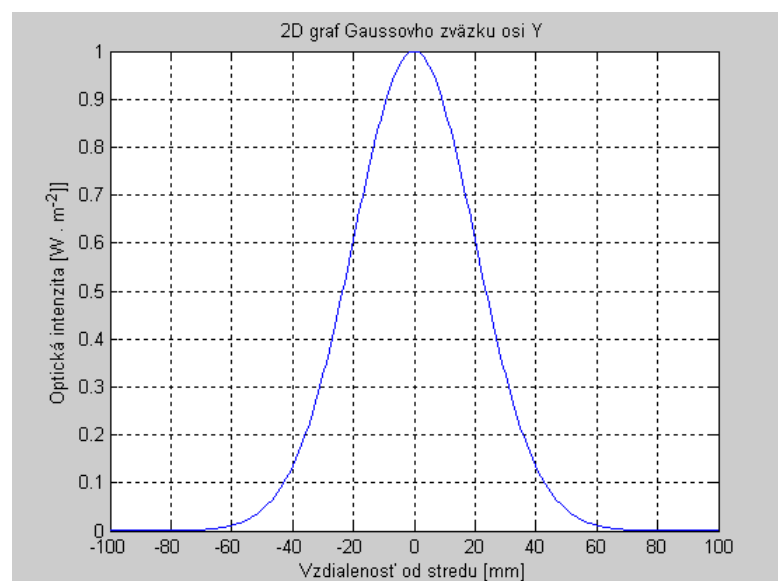
Vstupom výpočtu, ktorý je určený pre užívateľa sú premenné I_0 , čo je intenzita v strede zväzku a premenné polo širok zväzku w_x a w_y v milimetroch. Pre výpočet kriviek dvojrozmerného grafu grafu je použitý ekvivalent vzťahu 5.1 ochudobnený o zlomok nežiaducej osi v exponente vzťahu.

V nasledujúcich obrázkoch, je možné vidieť výstupy skriptovacieho súboru. Dvojrozmerné grafy z pohľadu osi X a Y v obrázkoch 5.1 a 5.2. Obrázok 5.3 s trojrozmerným grafom celého výsledného zväzku.

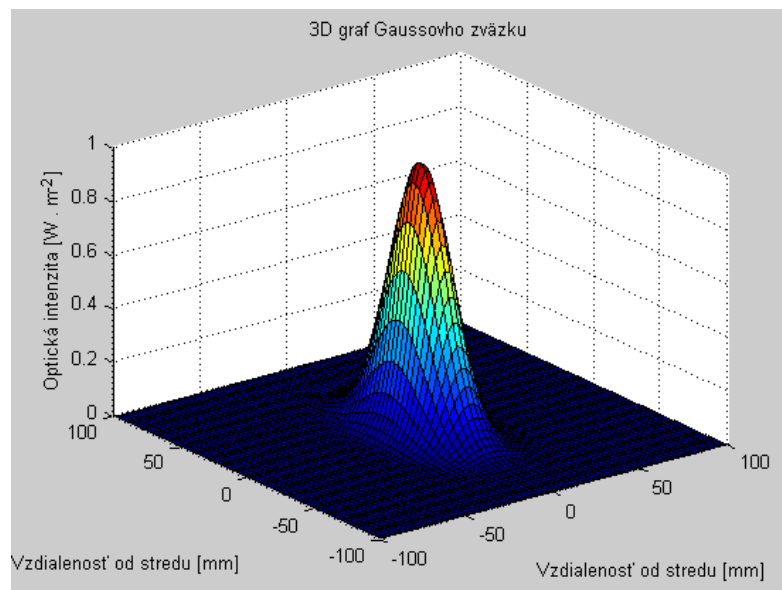
V prípade zadání rôznych veľkostí polo širok zväzku je výsledný Gaussov zväzok eliptický. V tom prípade sú dvojrozmerné grafy od seba rôzne. Ak sa zadá rovnaká hodnota polo širok zväzku výstupom je Gaussov zväzok s kruhovou stopou. V takom prípade budú výstupy dvojrozmerných grafov rovnaké.



Obrázok 5.1: *Dvojmerný graf modelovaného Gaussovho zväzku z pohľadu osi X*



Obrázok 5.2: *Dvojmerný graf modelovaného Gaussovho zväzku z pohľadu osi Y*



Obrázok 5.3: Trojrozmerný graf modelovaného Gaussovho zväzku

5.2 Rozloženie optickej intenzity Top Hat zväzku

Top.m je názov skriptovacieho súboru, ktorého výstupom je dvojrozmerný graf zväzku typu Top Hat a jeho trojrozmerný graf. Jeho obsah je možné nájsť v prílohe B. Dvojrozmerný graf je v prípade tohto výstupu len jeden, pretože ide o model Top Hat zväzku kruhovej stopy. Dvojrozmerný graf tohto modelovaného zväzku bude vždy rovnaký či už sa bude jednať o pohľad z osi X alebo Y.

Výpočet pre intenzitu Top Hat zväzku je uvedený vo vzťahu 5.2. Výpočet prebieha z výkonu, zadaného vo Wattoch. V prípade, že by užívateľ chcel zobrazit' model tohto zväzku o určitej intenzite môže namiesto vzťahu vložiť priamo hodnotu intenzity. V opačnom prípade je premennou pre výpočet výkon, na rozdiel od predošlého modelu. Druhým premenným parametrom modelu je priemer zväzku D . Výstupy, resp. grafy sú uvedené v obrázkoch 5.4 a 5.5.

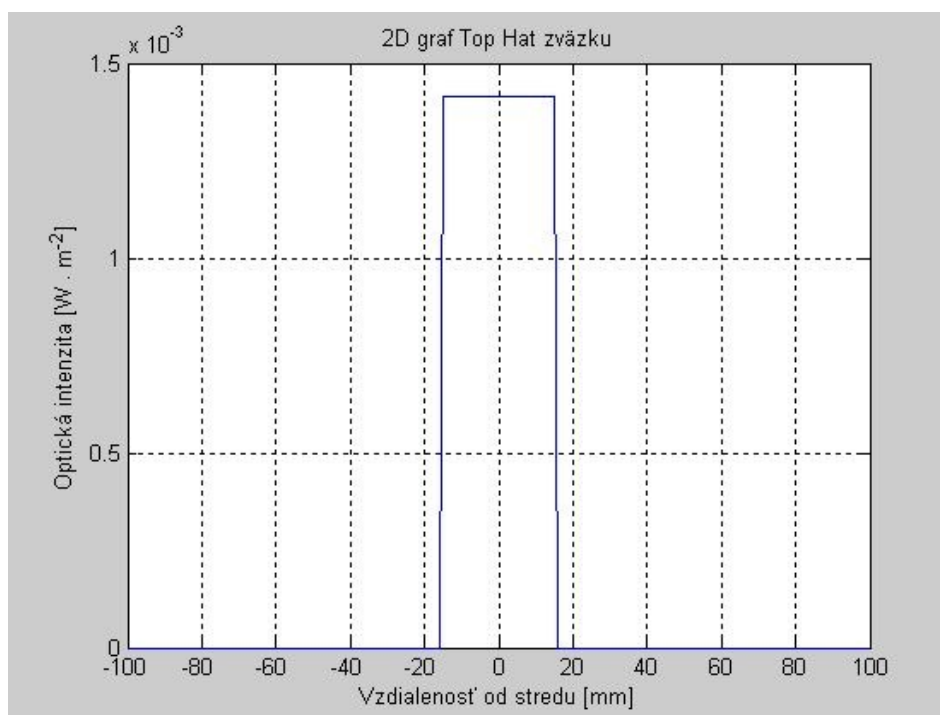
$$I = \frac{P}{\left(\pi \frac{D^2}{4}\right)} \quad (5.2)$$

kde D je vyššie spomínaný priemer zväzku, I je výsledná intenzita a P je optický výkon.

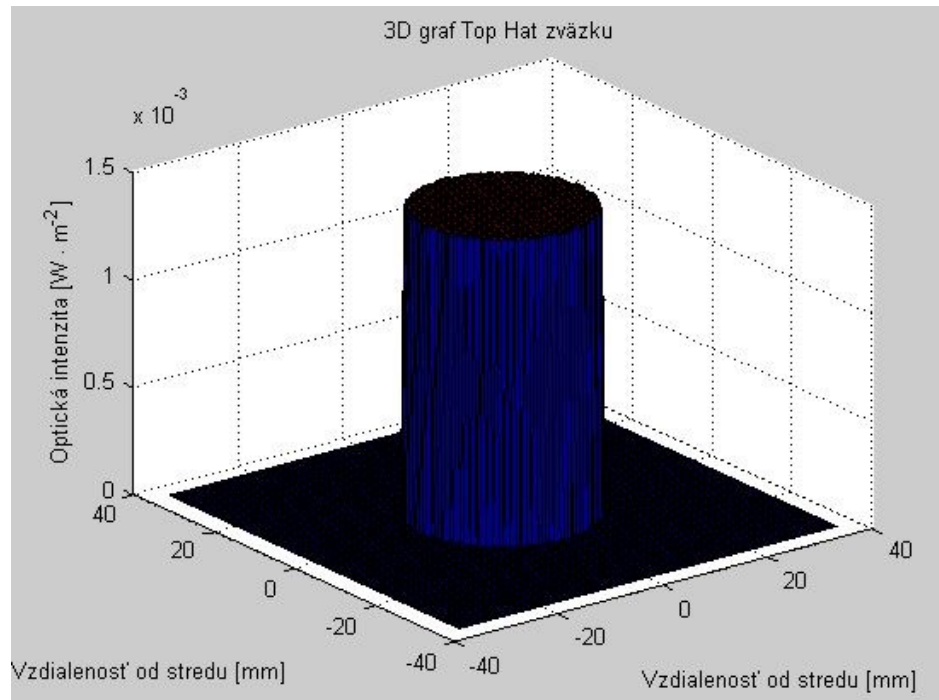
Umiestnenie a tvar zväzku je daný distribúciou

$$I(x, y) = \begin{cases} P / \left(\pi \frac{D^2}{4}\right), & \sqrt{x^2 + y^2} \leq \frac{D}{2} \\ 0, & \sqrt{x^2 + y^2} > \frac{D}{2} \end{cases} \quad (5.3)$$

kde P je výkon, D priemer zväzku, x a y vzdialenosti od stredu zväzku.



Obrázok 5.4: Dvojrozmerný graf modelovaného Top Hat zväzku



Obrázok 5.5: Trojrozmerný graf modelovaného Top Hat zväzku

6 Program pre meranie profilu laserového zväzku

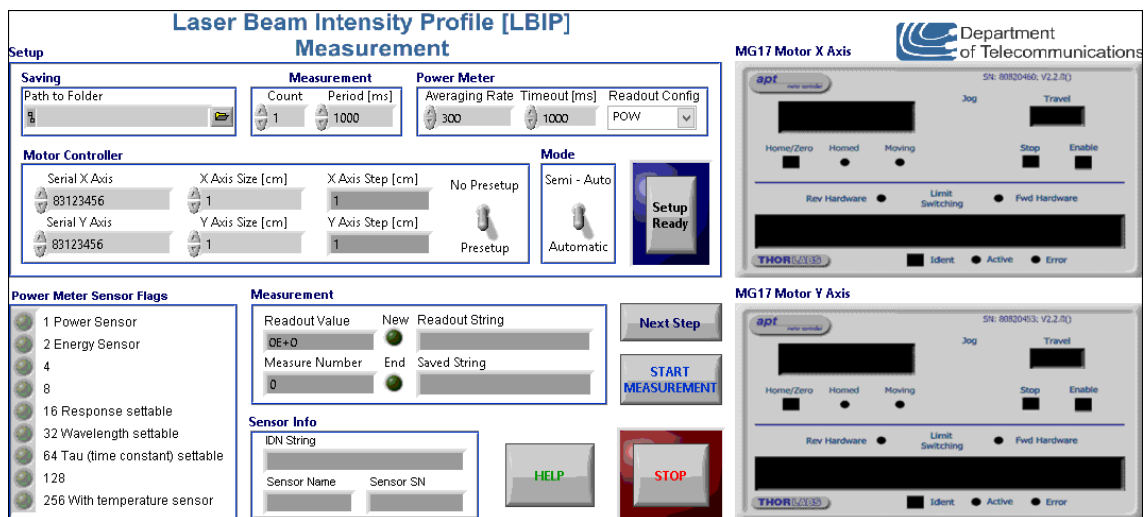
Súčasťou diplomového projektu je optimalizácia programu na meranie profilu laserového zväzku. Programom ovládateľné zariadenia, ktoré sú potrebné pre meranie sú Thorlabs Powermeter PM100D, dvakrát posuv Thorlabs NRT150/M spolu s dvomi riadiacimi jednotkami Thorlabs APT – stepper motor controller a PC. Na stránkach výrobcu sú k dispozícii užívateľské príručky jednotlivých zariadení, ku ktorým patria aj informácie pre programátorov. V nich je možnosť riadiť merač výkonu aj krokový posuv pomocou dvoch softvérov. Matlab a LabVIEW. K nim ponúkal aj základný popis inštrukcií a používaných metód pre zaobchádzanie s týmito zariadeniami.

Rozhodol som sa v práci použiť pre optimalizáciu programu LabVIEW, kvôli jeho lepšej stabilite. Súčasťou PM100D bol aj program s názvom „PM100D Simple Example“, ktorý demonštroval základné ovládanie a získanie hodnôt zo senzoru zapojeného do merača výkonu. Tento program bol zhotovený práve v LabVIEW. U motorizovaných posuvov nebol k dispozícii program, no výrobca mal na svojich webových stránkach manuál, ktorý krok po kroku viedol užívateľa k zhotoveniu základného programu. Bol schopný komunikovať s ovládačom riadiacich jednotiek krokového motorického posuvu. Tie sa stali jadrom pre program použitý v meraní diplomovej práce. Ich detailnejší popis je možné nájsť v manuáloch umiestnených na stránkach výrobcu.

Optimalizovaný program spolupracuje s ovládačmi Thorlabs APT a Thorlabs PM100-PM200 Utility. Názov programu je LBIP_Measurement (Laser Beam Intensity Profile). Spustiteľnú aplikáciu programu s dokumentáciu možno nájsť v elektronickej prílohe.

6.1 Čelný panel

Vývojové prostredie LabVIEW ponúka užívateľovi ovládať programy pomocou čelného panelu. Základný popis čelného panelu z obrázka 6.1 nájdete v tejto kapitole.



Obrázok 6.1: Čelný panel programu LBIP_Measurement

Môžeme vidieť, že čelný panel sa rozdeľuje na niekoľko blokov. Väčšina z nich je charakteristická modrým orámovaním. Prvý najväčší blok je s názvom **Setup**. V ňom je možné nastaviť všetky potrebné hodnoty a parametre merania. Táto činnosť je prvým krokom užívateľa pri ovládaní programu (viac v podkapitole 6.2). Tento blok je rozdelený na 6 častí. V časti **Saving** sa nastavuje cesta k zložke, do ktorej sa uložia namerané dáta. V časti **Measurement** sa určuje počet celkových meraní a časová perióda použitá v týchto meraniach. Časť **Motor Controller** má účel získať informácie pre riadiace jednotky motorických posuvov. Sériové čísla riadiacich jednotiek sú potrebné pre nadviazanie komunikácie. *X/Y Axis Size* udáva informácie o meranej ploche. V tejto časti je tiež možné nastaviť predvolené nastavenie ovládača riadiacich jednotiek alebo si overiť veľkosť kroku posuvov v meraní. V časti **Mode** je užívateľ schopný zvoliť medzi automatickým režimom merania alebo poloautomatickým, v ktorom bude program čakať na jeho povel. Poslednou časťou je tlačidlo s svetelným rámom, ktorým užívateľ potvrdí nastavenie.

V bloku **Measurement** môže užívateľ počas merania sledovať informácie o meraní. O zaznamenaní novej hodnoty, sledovanie nameranej hodnoty a zapísanej hodnoty a čísla merania. V tomto bloku sa tiež dozvie v akom stave meranie je, teda či program práve meria alebo sa vracia na pôvodnú pozíciu.

V blízkych blokoch s názvom **Power Meter Sensor Flags** a **Sensor Info** môžeme nájsť informácie o senzore zapojenom do merača výkonu.

Približne v strede spodnej časti čelného panelu sa nachádzajú tlačidlá pre ovládanie merania spolu s tlačidlom pre pomoc a tlačidlom, ktoré ukončí celý program.

Posledné dva bloky **MG17 Motor X/Y Axis** sú bloky ovládačov motorických posuvov, ktoré sú ovládané pomocou riadiacich jednotiek. Ak by sme teda spustili samotný ovládač pre ovládanie jedného posuvu čelný panel tohto ovládača by vyzeral práve tak, ako jeden z týchto blokov.

Detailný popis jednotlivých komponentov čelného panelu spolu s popisom použitých premenných nájdete v podkapitole 6.3. Informácie potrebné pre ovládanie programu s týmto čelným panelom sú v nasledujúcej kapitole.

6.2 Návod na použitie

Táto podkapitola sa venuje detailnému popisu ovládania programu. Po zostavení meracieho pracoviska a pripravenia zariadení ich zapojíme pomocou USB do PC, ktorý obsahuje program a vyššie spomínané ovládače. Zariadenia zapneme, spustíme program a môžeme postupovať podľa nasledujúceho stručného postupu:

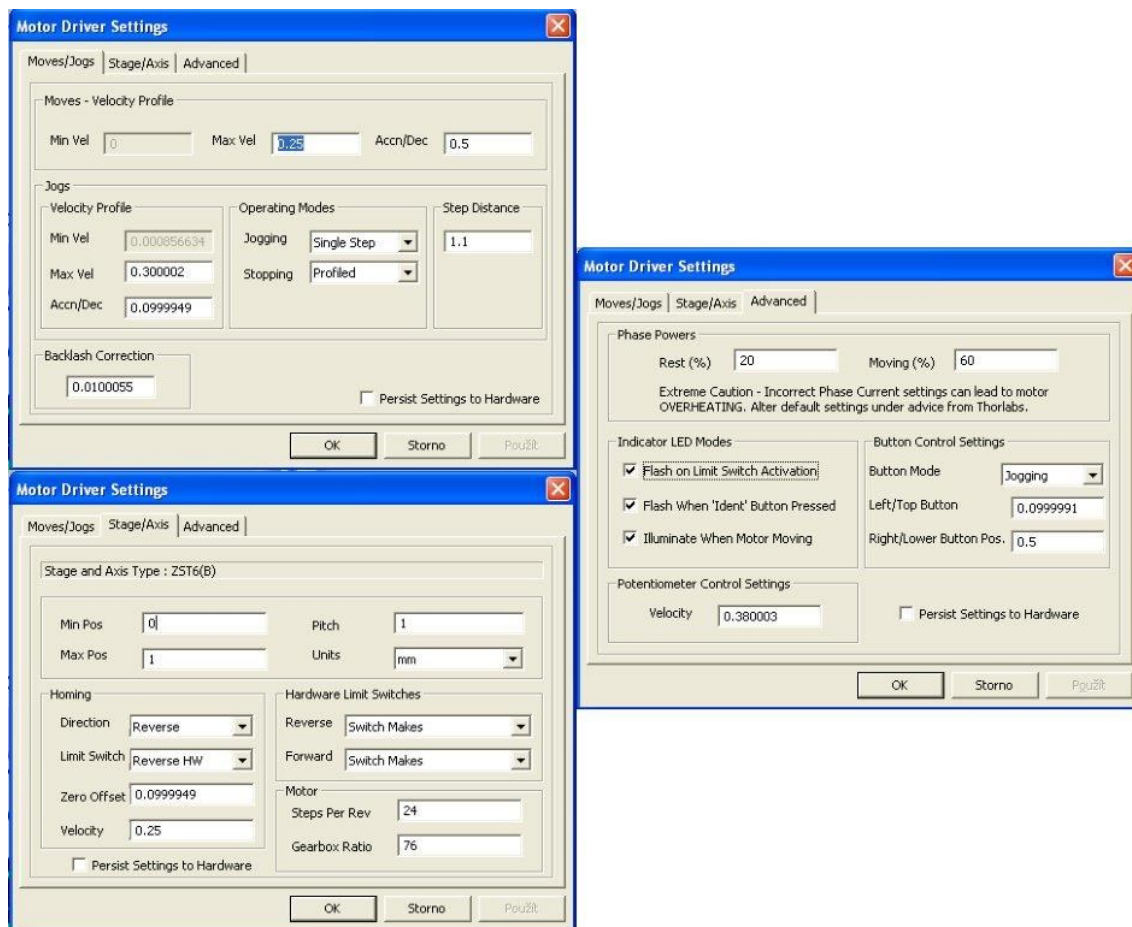
1. Nastavíme potrebné údaje v bloku **Setup**. Sériové čísla riadiacich jednotiek motorických posuvov podľa ich umiestnenia (osa X a Y). Veľkosť meranej plochy resp. veľkosť ôs v cm. Zvolíme si, či chceme prednastaviť ovládače riadiacich jednotiek a merací režim (automatický, poloautomatický). Určíme cestu k zložke, v ktorej sa budú

- vytvárať súbory s nameranými hodnotami. Zadáme čas periódy merania, počet meraní, časovanie merača výkonu a rýchlosť vzorkovania.
2. Preveríme si správne nastavenie a potvrdíme tlačidlom *Setup Ready*. To sa prejaví zažiaraním rámu tlačidla.
 3. Na čelnom paneli sa objaví zoznam pripojených zariadení. Z nich vyberieme merač výkonu a potvrdíme tlačidlom *OK*. Taktiež vyčkáme kým sa zapnú ovládače riadiacich jednotiek.
 4. Správne nastavenie kroku, ktorý má senzor prechádzať v meracej ploche si overíme v časti **Setup** (*X/Y Axis Step*). V prípade zmeny zvolíme na každom ovládači riadiacich jednotiek tlačidlo *Settings* (umiestnené v pravom dolnom rohu ovládača osi). Zmenu kroku zadáme do políčka *Jog Step Size* v centimetroch a to tak, že túto hodnotu zadávame po prenásobení číslom 1,1. Napr. krok 1 cm zadáme konštantou 1,1, krok 0,5 cm konštantou 0,55. Zvolenú hodnotu overíme v bloku **Setup**.
 5. Ak je všetko nastavenie v poriadku môžeme spustiť meranie tlačidlom *START MEASUREMENT*. V prípade automatického režimu sa meranie vykoná samo. V prípade, že sme zvolili polo automatický režim prechod na ďalšiu pozíciu senzoru musíme potvrdiť tlačidlom *Next Step*.
 6. Po vykonaní merania sa senzor vráti do štartovnej pozície a meranie sa zopakuje toľko krát, koľko sme nastavili v prvom kroku. Po ukončení posledného merania a vrátení senzoru sa program ukončí.

Po prvom pustení programu potrebujeme nastaviť parametre merania a parametre potrebné pre zariadenia. Prvé sú sériové čísla riadiacich jednotiek motorický posuvov. Je vhodné zvoliť za osu X práve tú riadiacu jednotku, ktorá ovláda motorický posuv umiestnený vodorovne a za osu Y tú, ktorá ovláda posuv pripevnený zvislo na vodorovnom. To preto, že najviac pohybu počas merania vykoná osa Y, pričom posuv priradený k osi X prejde svoju dĺžku počas merania len jeden krát. Potom absolvuje opäť cestu do štartovnej polohy. Tento typ pohybu je vhodný práve pre ten motorický posuv, ktorý nesie celú hmotnosť druhého posuvu, detektoru a príslušenstva potrebného pre upevnenie detektoru.

Dĺžky týchto osí určuje hodnota premenných *X/Y Axis Size*. Tým sa zároveň určí plocha, v ktorej bude snímať senzor počas merania. Hodnoty sa zadávajú v centimetroch a je vhodné použiť celé číslo. Je možné použiť aj číslo, ktoré nepatrí do množiny celých čísel no v takom prípade by mal mať užívateľ premyslený vhodný krok, ktorý zvolí tak aby senzor prešiel celou plochou. V opačnom prípade senzor prejde menšiu, než zvolenú plochu.

Krok merania sa nastavuje až v treťom kroku návodu. Dôvod prečo tomu tak je, je úzko spätý s tlačidlom *Presetup*. Použité riadiace jednotky v meraní tejto diplomovej práce ovládajú motorický posuv len za určitých podmienok. Ak nie sú premenné ovládača nastavené podľa obrázka 6.2, tak riadiaca jednotka neovláda posuv správne. Ten sa zasekáva, jedným smerom prechádza vzdialenosť nesprávnym krokom, pri vracaní do štartovnej polohy tento krok mení. Pri testovaní týchto riadiacich jednotiek, bolo zistené že nie je nič s nimi v poriadku. Ich ovládanie bolo testované na viacerých zariadeniach s rôznymi operačnými systémami a rôznymi verziami ovládačov a prejavovali stále podobné chyby.



Obrázok 6.2: Potrebne hodnoty nastavenia ovládača pre správnu funkciu riadiacich jednotiek motorických posuvov

Keďže nastavovanie všetkých hodnôt pre správne ovládanie týchto dvoch riadiacich jednotiek pred každým meraním by bolo práčne a časovo náročné vytvoril som v programe časť, ktorá volá metódy ovládačov a nastavuje tieto konštanty do ovládača priamo tesne po zapnutí ovládača v programe (viac v podkapitole 6.4.2). S správne zapísanými konštantami užívateľ môže nastavovať už len potrebný krok bez toho, aby musel meniť všetky konštanty riadiacich jednotiek. V prípade, že užívateľ použije iné riadiace jednotky, ktoré nebudú prejavovať tento typ problému môže prednastavenie týchto konštánt vypnúť zmenením polohy tlačidla na *No Presetup*.

Jedným z problémov, ktoré mali riadiace jednotky použité v tejto práci bol aj krok. Podľa dokumentácie ovládačov by sa mal zadávať krok v milimetroch. No ak zadáme krok takto riadiace jednotky nebudú ovládať motorický posuv správne. Ak ho ale zadáme v centimetroch po prenasobení konštantou 1,1 posuv potom prejde presne trasu 1 cm aj napriek tomu, že ovládač tento krok požaduje zadať v milimetroch. Užívateľ si ale môže správne nastavenie kroku overiť v indikátoroch *X/Y Axis Step* v časti **Setup**. Ich hodnoty sa pravidelne obnovujú pomocou metódy, ktorá zisťuje ich hodnotu z ovládača riadiacich jednotiek.

Nastavením módu si volíme medzi možnosťami automatického a poloautomatického režimu. Ak užívateľ požaduje aby sa senzor pohol do ďalšej polohy až po jeho povelé zvolí si možnosť Semi-Auto. V prípade, že užívateľ chce aby sa celé meranie uskutočnilo automaticky zvolí polohu Automatic.

V prípade poloautomatického režimu sa hodnota zaznamená do súboru po pokyne užívateľa. Ak sa ale užívateľ rozhodne zmeniť nastavenia merača výkonu (popísane nižšie) môže sa stať, že bude potrebovať viac času na zaznamenanie hodnoty. Ak by sa tento čas nezvýšil hodnota výkonu, ktorá by bola zaznamenaná do súboru by bola hodnota, ktorú vyhodnotil merač výkonu počas pohybu senzoru a meranie by potom nebolo správne.

Nastavenia meraču výkonu je možné vykonať v bloku **Setup** v časti **Power Meter**. Premenná *Averaging Rate* určuje koľko z koľkých hodnôt zaznamenaných senzorom vráti merač výkonu priemer do programu. *Timeout [ms]* určuje v milisekundách čas, ktorý ma merač výkonu na vzorkovanie. Ten je schopný zvládnuť podľa výrobcu 3000 vzoriek za jednu sekundu. Ak teda užívateľ požaduje priemernú hodnotu z viac než 3000 vzoriek potrebuje zvýšiť čas premennej *Timeout [ms]*. Hodnota tohto času sa pripočíta k siedmim sekundám nastaveným v programe ako časový cyklus. V prípade kroku 1cm potrebujú motorické posuvy šesť sekúnd na presun jednu sekundu a uloženie hodnoty.

V časti **Measurement** premennou *Count* môže užívateľ nastaviť počet meraní, ktoré chce aby program vykonal. Program potom vykoná meranie a vráti sa do pôvodnej polohy toľko krát, koľko si zvolí užívateľ.

Poslednou časťou bloku **Setup** je premenná *Path to Folder* v časti **Saving**. Tú si užívateľ vyberie cestu k zložke, do ktorej bude program vytvárať súbory s nameranými hodnotami.

Po prevedení základného nastavenia užívateľ stlačí tlačidlo *Setup Ready*, čím indikuje programu, že môže nadviazať komunikáciu ovládačov s hardvérom. Svetelný rám tlačidla sa po tejto činnosti rozsvieti a celú dobu behu programu informuje o tom, že základné nastavenie už bolo vykonané. Pre zachovanie správnej funkcie programu by užívateľ po tejto akcii nemal meniť hodnoty v bloku **Setup**.

Okamžite po stlačení tohto tlačidla sa zobrazí v strede čelného panelu okno zoznamu pripojených USB zariadení, v ktorých užívateľ zvolí pripojený merač výkonu. U niektorých zariadení, či operačných systémov sa môže stať, že sa tento zoznam objaví prázdny a zariadenie sa nenájde ani po zvolení možnosti *Rescan*. V takom prípade treba počkať niekoľko minút (max. 5). Treba si uvedomiť, že nejde o chybu programu samotného. Z rovnakej príčiny sa občas môže stať, že pri nadväzovaní komunikácie s riadiacimi jednotkami motorického posuvu sa objaví chyba komunikácie. Tá hlási, že zariadenie nebolo nájdené alebo nie je vôbec pripojené. V takom prípade je potrebné reštartovať program. Ak sa chyba opakuje je nutné reštartovať riadiace jednotky.

Správne pripojenie hardvéru spoznáme tak, že bloky ovládačov *MG17Motor X/Y Axis* sú plne rozsvietené a rovnako aj niektoré diódy v časti **Power Meter Senzor Flags**

a **Senzor Info**. V oboch spomínaných blokoch sú informácie o senzore, ktorý je práve pripojený k meraču výkonu, ako už bolo spomínané v predošlej podkapitole.

V tomto momente je možné meniť v ovládačoch riadiacich jednotiek krok, ktorý bude posuv vykonávať počas merania. A to spôsobom, ktorý je popísaný v bodovom návode. Po prípravách je možné spustiť meranie tlačidlom *START MEASUREMENT*. Po jeho stlačení začne program merať podľa navolených parametrov. Ak je zvolený automatický režim program vykoná celé meranie toľko krát, koľko zadal užívateľ. Potom čo naposledy vráti senzor na jeho pôvodnú pozíciu sa program sám ukončí. V prípade poloautomatického režimu začne program po stlačení tlačidla *START MEASUREMENT* merať prvú polohu. Po získaní a uložení hodnoty vyčká na povel užívateľa, ktorý môže vykonať stlačením tlačidla *Next Step*. Keď sa ukončí meranie program automaticky bez čakania na povel vráti senzor na pôvodnú pozíciu. Ak je toto meranie posledným meraním program sa po vrátení senzoru ukončí.

Počas celého behu programu má užívateľ možnosť využiť tlačidla *STOP* a *HELP*. Stop tlačidlo po stlačení začne ukončovanie programu. To, že program zaznamenal tento povel sa prejaví zažiaraním jeho rámu. Samotné ukončenie programu ešte nejakú dobu môže trvať, v závislosti od doby resp. fázy v ktorej bolo tlačidlo stlačené. Je tomu tak preto, že je potrebné ukončiť komunikáciu s hardvérom bez toho aby mohlo dôjsť k jeho poškodeniu.

Interakciou s tlačidlom *HELP* sa na čelnom paneli objaví okno s informáciami o programe a informácie o pomocných súboroch. S ich pomocou je užívateľ schopný riešiť vzniknuté problémy alebo sa informovať o ovládaní programu. Okno pomoci užívateľ môže zatvoriť tlačidlom *OK*.

6.3 Popis použitých premenných

Program používa veľké množstvo premenných. Každá má svoj účel a nie všetky je možné pozorovať na čelnom paneli. Delia sa na dva typy. Prvý riadiaci typ premennej je typ premennej, ktorý môže užívateľ meniť jej hodnotu. Druhý je typ indikátoru, ktorý má za úlohu zobrazovať svoju hodnotu užívateľovi podľa akcií, ktoré program vykoná. Zoznam všetkých premenných a informácie o nich je možné nájsť v tabuľkách v prílohe H.

Popis správania jednotlivých premenných spolu s detailným popisom funkcie programu je v podkapitole 6.4.

6.4 Blokový diagram programu

Blokový diagram popisuje funkciu a správanie programu. Vďaka jeho veľkosti je kompletný blokový diagram umiestnený v elektronickej prílohe. Taktiež je ho možné nájsť v elektronickej dokumentácii programu. V obrázku 6.3 je schéma blokového diagramu, ktorá ho rozdeľuje na niekoľko častí podľa jeho funkcie. Účel schémy je zjednodušiť celkový náhľad na blokový diagram a pre lepšie pochopenie funkcie celého programu. Popis týchto častí spolu s zobrazením časti blokového diagramu sa venujú podkapitoly.

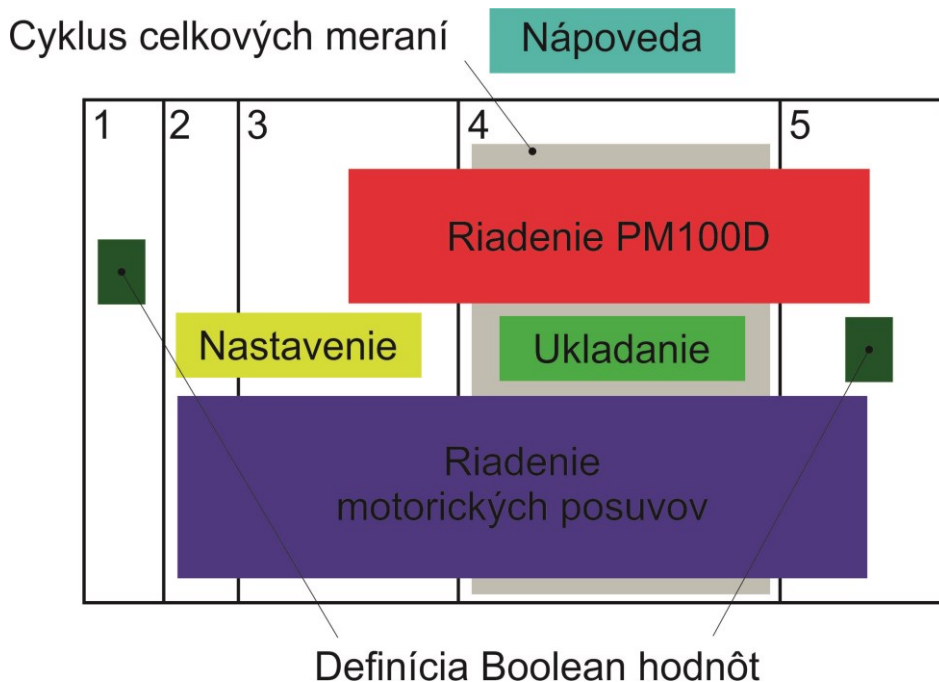
Celý beh programu je rozdelený štruktúrou *Flat Sequence*, ktorá zabezpečuje časovú postupnosť behu celého programu. Je zložená z piatich častí a obsahuje hlavné bloky programu. V prvej časti sú nastavované hodnoty niektorých premenných typu boolean. Program sa touto časťou pripraví na funkciu. V druhej časti sa vykoná základné nastavenie. Hlavným účelom tejto časti je získať od užívateľa sériové čísla riadiacich jednotiek motorických posuvov, aby v ďalšej časti mohlo dôjsť k nadviazaniu komunikácie ovládača s zariadeniami. Beh tejto časti programu sa ukončí potvrdením užívateľa, konkrétne tlačidlom *Setup Ready*.

Tretia časť dokončuje nastavenie. Utvorí komunikáciu medzi hardvérom jeho ovládačmi a programom. V tejto časti sú tiež definované premenné potrebné pre zadanie parametrov merania. Táto časť programu sa ukončí povelením od užívateľa. A to vtedy keď užívateľ začne meranie pomocou tlačidla *Start Measurement*.

Štvrtá časť je jadrom samotného programu. Prebieha v nej ovládanie hardvéru, meranie, získavanie, priemerovanie a ukladanie hodnôt. Táto časť sa vykoná toľko krát, koľko meraní užívateľ navolí. Beh tejto časti programu sa ukončí v moment, keď sa ukončí posledné meranie a posuvy sa vrátia do štartovacej polohy.

Piata časť má za úlohu opätovné nastavenie niektorých premenných typu boolean. Okrem toho zabezpečuje správne ukončenie komunikácie medzi programom, ovládačmi hardvéru a hardvérom samotným.

Paralelne popri tom vykonáva funkciu cyklus náповede, aby mal užívateľ možnosť tejto funkcie počas celého behu programu.



Obrázok 6.3: Schéma blokového diagramu programu

Ako už bolo spomenuté tyrkysový blok sa venuje nápovede. Tmavozelené bloky nastavujú hodnoty niektorých premenných typu boolean, aby sa zachovala správna funkčnosť programu pri jeho zapnutí a pri jeho ukončení.

Červený blok popisuje riadenie merača výkonu. Táto časť bola vytvorená výrobcom merača výkonu Thorlabs PM100D. Zabezpečuje komunikáciu s meračom výkonu, jeho základné nastavenie a ukončenie komunikácie s ním. Zároveň získava nameranú priemerovanú hodnotu merania. Detailný popis tejto časti a dokumentáciu nájdete v manuáli merača výkonu.

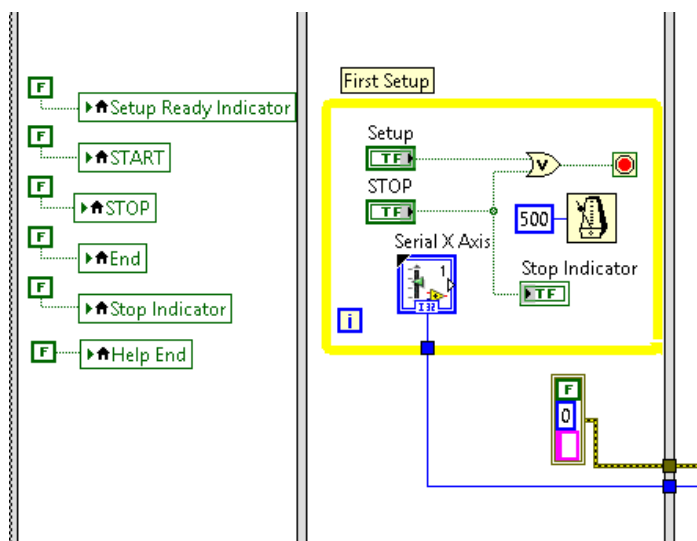
Žltý blok zabezpečuje nastavenie parametrov, podľa, ktorých sa meranie uskutoční. Zelený má na starosti správu súborov a ukladanie hodnôt do týchto súborov.

Modrý blok popisuje riadenie motorických posuvov os X a Y. Zabezpečuje ich nastavenie, správnu funkciu pri meraní, vrátenie sa do štartovnej pozície a ukončenie komunikácie.

Sivý blok opisuje cyklus meraní a jeho parametre s indikátormi. Vďaka tejto časti je možné zadať programu počet, koľko krát sa má meranie uskutočniť.

6.4.1 Základné nastavenie (Časť 1, 2)

Cieľom základného nastavenia je, aby program nastavil riadiace premenné tak, aby sa mohlo pokračovať v ďalšom behu programu. Prvou časťou sekvencie je nastavenie niektorých boolean premenných na nepravdu (viď obr. 6.4). Táto časť sa vykoná sama bez vedomia užívateľa vždy tesne po spustení programu.



Obrázok 6.4: Blokový diagram základného nastavenia

Setup Ready Indicator je svetelný rám okolo tlačidla, ktorý musí byť na začiatku programu zhasnutý. Zasvieti sa až po stlačení tlačidla *Setup Ready*. To nie je potrebné ošetrovať, pretože mechanická akcia tohto tlačidla je nastavená tak, že iba ak je tlačidlo stlačené užívateľom je v pravdivom stave. Nepravda tlačidla *STOP* zabezpečuje aby sa program hneď

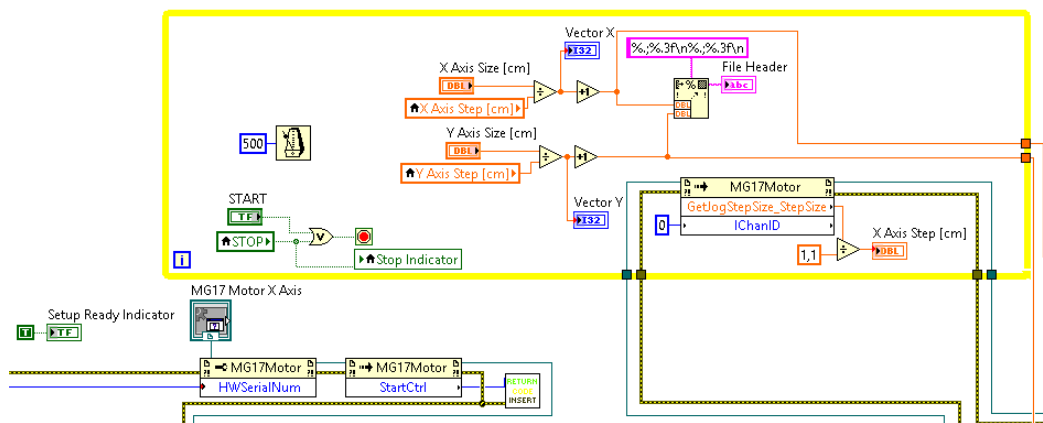
po spustení nevypol. K nemu treba do patričného stavu zmeniť aj jeho svetelný rám, ktorým je *Stop Indicator*. U tlačidla *START* tento stav zabezpečuje aby sa hneď nespustilo meranie po vykonaní základného nastavenia bez toho, aby užívateľ mal nastavené všetky parametre merania. *End* by v opačnom stave mohol spôsobiť desynchronizáciu ukladania s pohybom. Aby bola užívateľovi dostupná možnosť náповede je potrebné do tohto stavu prepnúť aj premennú *Help End*.

V druhej časti prebieha čakanie na hodnoty pre premenné *Serial X/Y Axis*, čo sú sériové čísla práve používaných riadiacich jednotiek motorických posuvov. Užívateľ si ich zadáním zvolí, ktorý posuv bude symbolizovať v meraní osu X alebo Y. Okrem toho sú v tejto časti definované prázdne premenné zabalené do premennej typu cluster. Tie sú určené pre chybové hlásenia pre každú riadiacu jednotku zvlášť.

Táto časť sa ukončí až na povel užívateľa. A to buď pomocou tlačidla *STOP*, ktoré ukončí postupne celý program alebo tlačidlom *Setup Ready*. Tento „čakajúci“ cyklus sa vykoná každej pol sekundy.

6.4.2 Nastavenie parametrov merania (Časť 3)

Keď už sú programu známe sériové čísla riadiacich jednotiek môže sa pokúsiť s obomi nadviazať komunikáciu. V obrázku 6.5 je v spodnej časti inicializácia ovládača riadiacich jednotiek, ktorá je rovnaká aj pre jednotku priradenú pre osu Y. Ovládanie riadiacej jednotky začína po vykonaní metódy *StartCtrl*. Potom riadenie jednotiek prechádza do časti prednastavenia, ktoré sa vykoná ak je zvolený stav nepravdy premennej *Presetup*. Schéma tejto časti je na obrázku 6.6, kde je zobrazená časť prednastavenia jednotky pre osu Y. Pre osu X jestvuje rovnaká schéma.



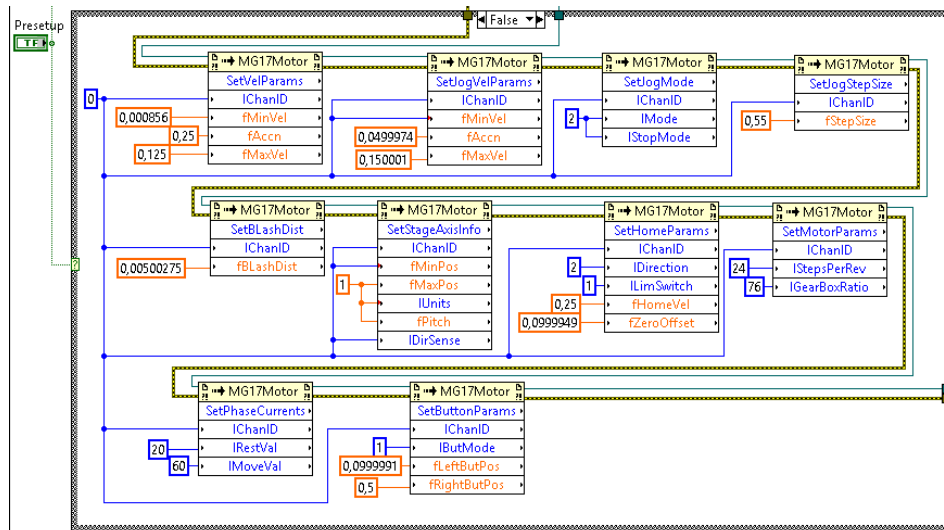
Obrázok 6.5: *Blokový diagram cyklu nastavenia parametrov*

Popri tejto udalosti sa udeje aj zmena svetelného rámu tlačidla *Setup Ready* na hodnotu pravdy. Diagram v tejto časti vyššie obsahuje inicializáciu pripojenia merača výkonu, čo sa prejaví v behu programu zobrazením okna s zoznamom pripojených zariadení. Keď sa pomocou adekvátnych metód nastavia hodnoty ovládača podľa obrázka 6.2 program sa dostane do ďalšieho cyklu, ktorý čaká na povel užívateľa. Cyklus sa ukončí rovnako

ako cyklus opísaný v predošlej podkapitole s tým rozdielom, že namiesto tlačidla *Setup Ready* užívateľ stlačí tlačidlo *Start Measurement*. Tým sa program dostane do tretej časti, ktorá je už samotným meraním. Čakajúca doba je rovnaká a to pol sekundy.

Vo vnútri cyklu sú používané riadiace a indikujúce premenné potrebné pre meranie. Premenné *X/Y Axis Size [cm]* slúžia na určenie rozmerov snímanej plochy pri meraní v centimetroch. Premenné *X/Y Axis Step [cm]* zobrazujú skutočnú hodnotu nastaveného kroku v ovládači v centimetroch. Táto hodnota je získaná z ovládača metódou *GetJogStepSize_StepSize*. Hodnota z tejto metódy je podelená konštantou 1,1, teda tou, ktorou ju musí užívateľ prenasobovať pri zadávaní do ovládača. V programe je tento postup zadávania kroku zvolený preto, že riadiace jednotky použité v meraní tejto práce mali problém načítať prenasobenú hodnotu kroku touto konštantou a to nech bola akéhokoľvek dátového typu. Problémom bolo, že túto už prenasobenú hodnotu ovládač pri každom spustení programu pojal inak. Raz zaznamenal hodnotu správne, v ďalšom spustení dvojnásobne, v inom polovične. To je hlavným dôvodom, prečo je v programe zvolený takýto spôsob zadávania kroku merania. Zvolená základná hodnota kroku je 1 cm (1,1).

So znalosťou týchto dvoch hodnôt je možné vypočítať ich podielom veľkosť vektorov, teda počet polôh, ktoré budú mať jednotlivé osi. Pravú veľkosť vektorov dostaneme ak tento podiel zvýšime o 1, pretože nulová poloha v zadanej ploche je tiež pozícia s ktorou treba počítať. Pre príklad: Ak za meranú plochu zvolíme štvorec 10 cm na 10 cm s krokom 1 cm podielom dostaneme hodnotu 10. Keďže program meria aj hodnoty na mieste, kde je plocha označená ako 0 cm pridáva nám to k počtu podielu jednu hodnotu vektoru navyše.



Obrázok 6.6: *Blokový diagram prednastavenia ovládača riadiacej jednotky pre motorický posuv*

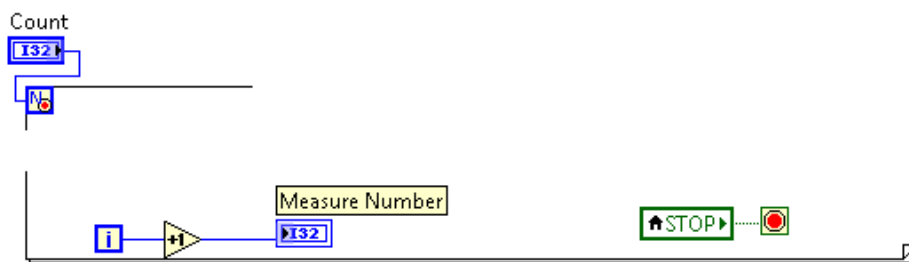
Ak nezvýšime túto hodnotu dostaneme len informáciu o vzdialenosti, čo sú premenné *Distance X/Y*. Tie sa využijú v meracej časti pri návrate senzoru na pôvodné miesto. Informácie o veľkosti vektorov využije aj program pre vizualizáciu, preto sa tieto vypočítané hodnoty

naformátujú a vytvorí sa hlavička pre súbor. Tá sa uloží do premennej typu string s názvom *File Header*.

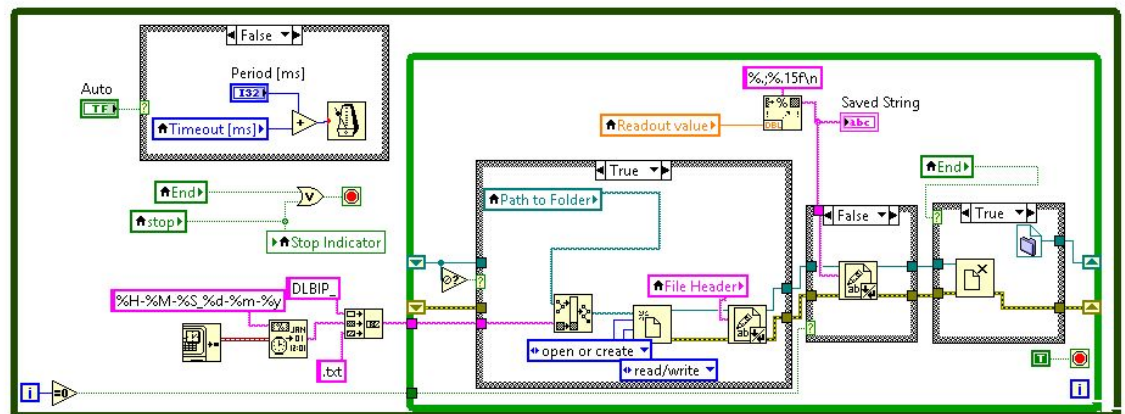
Po zadaní všetkých parametrov merania, overenie si ich správnosti môže užívateľ povelenom prejsť na vykonanie štvrtej časti.

6.4.3 Meranie (Časť 4)

Celá štvrtá časť je uzavretá v cykle typu for (viď obr. 6.7). Ten zabezpečuje opakovanie definovaného merania. Premenná *Count* udáva množstvo vykonaných cyklov a teda aj meraní. *Measure Number* je indukujúca premenná, ktorá zobrazuje číslo aktuálneho merania. Toto číslo je oproti číslu iterácie zvýšené o 1, pretože iterácie cyklu sú počítané od nuly.

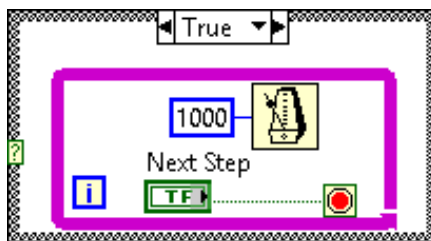


Obrázok 6.7: Blokový diagram cyklu celkových meraní



Obrázok 6.8: Blokový diagram cyklu ukladania do súboru

V obrázku 6.8 môžeme vidieť schému ukladačích cyklov. Vonkajší (tmavozelený) cyklus sa opakuje počas celého merania až kým neskončí. Tento koniec môže nastať ukončením merania alebo jeho zastavením užívateľom. Časovanie tohto cyklu je volené podľa typu režimu (mode). V prípade automatického režimu cyklus čaká vždy dobu stanovenú užívateľom (súčet premenných *Period* a *Timeout*). V prípade poloautomatického režimu sa čaká pomocou ďalšieho cyklu typu while na povel od užívateľa. Schému cyklu čakajúceho na povel môžete vidieť v obrázku 6.9.



Obrázok 6.9: Schéma cyklu čakajúceho na povel Next Step

Samotné ukladanie sa deje len vo vnútornom cykle, ktorý nepotrebuje časovanie, pretože sa vykoná vždy iba jeden krát. Prvým krokom ukladania je vytvorenie názvu súboru a zvolenie jeho typu. Najprv sa vo vonkajšom cykle zistí aktuálny dátum a čas (vždy pri novom začatí cyklu). Ten sa naformátuje do podoby H:M:S_D:M:R. Na začiatku reťazca názvu je skratka DLBIP (Data of Laser Beam Intensity Profile). Po oddelení podčiarkovníkom sa do názvu pridá naformátovaný čas a dátum. V závere sa k tomuto reťazcu pripojí formát a to konkrétne .txt. Program bude preto pri automatickom ukladaní vytvárať súbory týmto spôsobom, preto ukladacia časť požaduje od užívateľa zvoliť len priečinok, do ktorého bude ukladať dátové súbory.

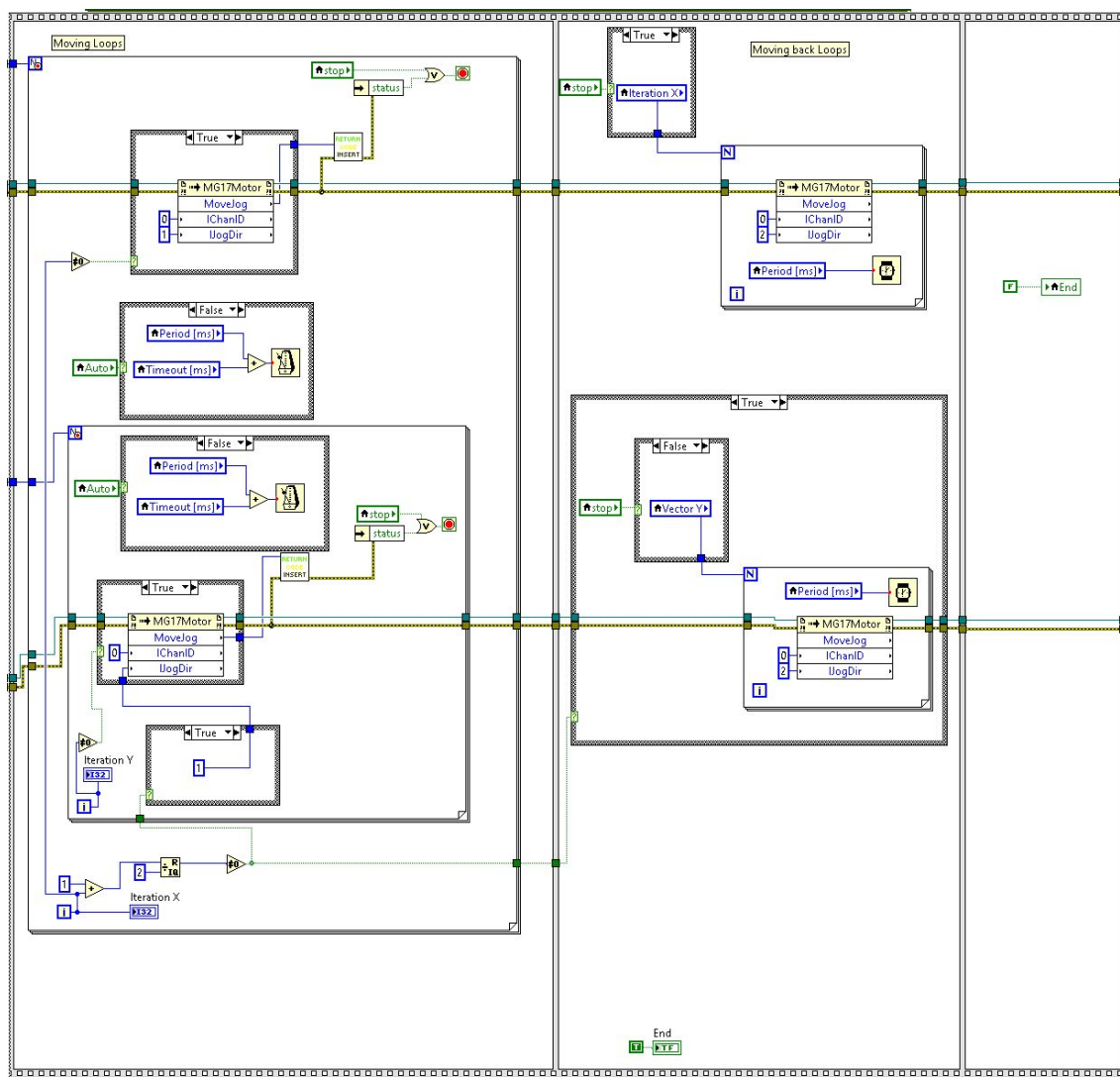
Vnútorný cyklus využíva takzvaných shift registers, ktoré si pamätajú hodnoty daných prepojení z predchádzajúcich cyklov. Ak sa vnútorný cyklus vykonáva úplne prvý krát znamená to, že nejestvuje žiadny vytvorený súbor, čo sa prejavuje nezvolenou cestou a teda prázdny shift registrom. Ak je táto podmienka splnená začne sa vykonávať prvý podmienkový blok, ktorý vytvorí súbor podľa cesty k zložke a automaticky vytvoreným názvom súboru. Na jeho začiatok potom zapíše obsah hlavičky, ktorá bola spomínaná v podkapitole 6.4.2. Ak podmienka splnená nie je znamená to, že cyklus vie o súbore, do ktorého práve zapisuje a preto nie je treba vytvárať nový alebo ho otvárať nanovo. V takom prípade sa nič z vyššie spomínaného v podmienkovej časti nevykoná. Je teda v tomto prípade prázdnu.

Obsahom druhej podmienky je prvok, ktorý vykonáva zápis jednotlivých nameraných hodnôt. Toto sa nevykoná pri nulej iterácii vonkajšieho cyklu, pretože tá nastáva pri úplne prvom cykle kedy ešte nestihne vzniknúť nameraná hodnota. Táto podmienka teda zabezpečuje aby dáta každého súboru nezačínali nulou. Preto v prípade, že ide o prvý vonkajší cyklus sa iba vytvorí súbor ale nezapíše sa doň táto nulová hodnota, pretože obsah podmienky je prázdny.

Nameraná hodnota sa získava z cyklu merača výkonu (viac v manuále PM100D). Táto hodnota sa naformátuje a to tak, že desatinná čiarka sa vymení za bodku a z hodnoty sa vezme 15 desatinných miest. Táto hodnota sa potom vypíše indikátorom *Saved String* a následne zapíše do vytvoreného súboru.

Ak sa meranie dostane ku koncu (*End* = true) vykoná sa obsah poslednej podmienky, ktorá ukončí otvorenie a zapisovanie do tohto súboru a vynuluje register, ktorý si pamätal cestu k tomuto súboru. Ak teda nastane ďalšie meranie v poradí vytvorí sa nový súbor s novým názvom podľa času.

Na obrázku 6.10 môžeme vidieť schému, ktorá zodpovedá za pohyb senzoru pri meraní.

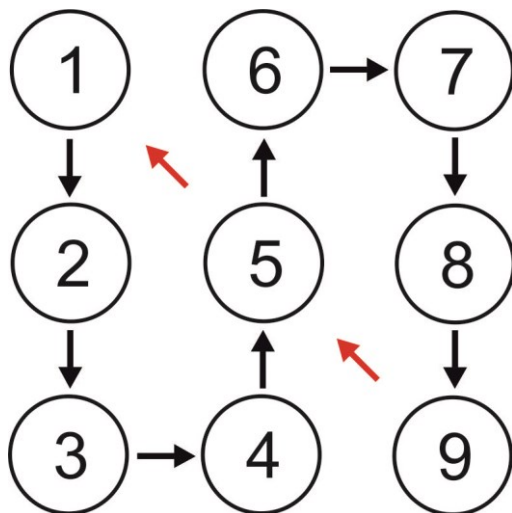


Obrázok 6.10: Blokový diagram riadenia motorických posuvov

Popri dvoch paralelných cykloch (cyklus ukladania, cyklus merania PM100D) sa vykonávajú cykly posuvu. Sú dva typy pohybových cyklov, ktoré sa vykonávajú postupne. Preto sú uzavreté v sekvencnej štruktúre. Časovanie cyklov je rovnaké ako u cyklu ukladania.

Prvý je pohyb pri meraní. Ide o dva cykly typu for, kde jeden je obsahom toho druhého. A to tak, že vonkajší cyklus pohybuje posuvom zvoleným pre osu X a vnútorný posuvom osi Y. Počet cyklov je daný veľkosťou vektorov X a Y. Pohyb posuvov sa vykonáva metódou *MoveJog* a tá sa vykoná vždy len nie v prvom prípade cyklov. To preto, aby senzor mohol zachytiť hodnotu na nulovej pozícii.

Vnútorný cyklus obsahuje viac podmienok. Ak nazrieme na obrázok 6.11 môžeme vidieť pohyb pri meraní. Posuv osi X sa vykonáva len jedným smerom. Jeho smer sa zmení až pri konci merania. Posuv osi Y ale pri každom posunutí osi X smeruje iným smerom, čo v konečnom dôsledku vytvorí pohyb vyznačený na obrázku čiernymi šípkami.



Obrázok 6.11: Znáznornenie pohybu senzoru pri meraní

V podmienkovej štruktúre je preto uzavretá konštanta, ktorá hovorí metóde, ktorým smerom má pohyb vykonať. Podľa iterácie vonkajšieho cyklu je možné určiť či ide o párnú alebo nepárnu iteráciu (zvýšenú o 1). Pri každej nepárnej iterácii posuv osi Y bude smerovať vpred, pri každej párnej bude smerovať vzad. Vďaka tomu sa výrazne zníži čas merania, pretože senzor začína merať tam, kde pred tým skončil a nemusí absolvovať počas merania cestu do pôvodnej pozície.

Takto sa pohyb merania opakuje, až dokým sa senzor nedostane na poslednú pozíciu. Vtedy nastane ďalšia časť sekvenčnej štruktúry. Návrat senzoru na pozíciu z ktorej začal meranie.

Posuv osi X pri návrate využíva cyklus, ktorý sa vykoná vždy (pretože osa X sa nevracia sama pri meraní). Podmienka pred cyklom určuje z akej premennej sa bude odoberať informácia o počte spätných krokov. Ak sa meranie uskutočnilo bez problémov znamená to, že prešla osa celú svoju vzdialenosť. Preto môže použiť cyklus premennú vzdialenosti. Ak bolo užívateľom meranie zastavené nemôže sa vrátiť posuv o celú vzdialenosť merania, pretože ju nevykonalo. Vtedy sa vykoná počet krokov podľa množstva vykonaných iterácií.

Hodnota iterácií sa nepoužíva v prípade, že sa meranie dokončí, pretože aktualizácia hodnoty tejto premennej počas merania a pri jej správnom ukončení nie je spoľahlivá. Znamená to, že ak sa program nastaví na vykonanie viacerého množstva meraní, tak pri niektorých správnych dokončeníach pohybu celej vzdialenosti nestihne hodnota iterácií aktualizovať, pri ďalšom už áno. Vďaka tomu, by sa pri väčšom množstve meraní nemusel senzor vrátiť vždy na správnu pozíciu a teda meraná plocha by sa posunula v priestore, čo je nežiaduce.

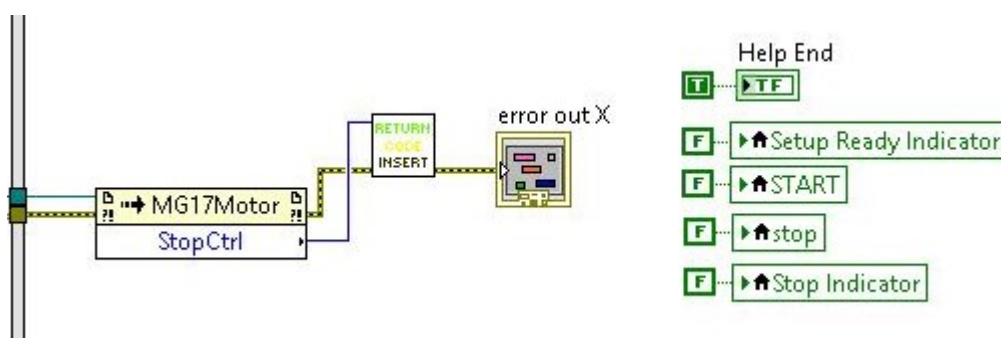
Rovnaké ošetrenie má aj cyklus návratu osi Y. Tá je navyše ošetrená podmienkou, ktorá kontroluje na ktorej pozícii senzor osi Y skončil. Ak je meranie vykonané podľa obrázka 6.11 A senzor skončí v polohe 9 senzor sa musí vrátiť ako z pohľadu osi X tak aj Y. Výsledný pohyb je potom znázornený červenými šípkami. Ak by bol vektor X veľkosti 2 a nie 3 merací senzor

by sa na konci merania nachádzal v polohe 6. Vtedy vzhľadom na pôvodnú pozíciu nie je potrebné aby sa posuv osi Y niekam pohyboval, pretože už je v správnej pozícii. V takom prípade sa žiadny pohyb osi Y nevykoná a vykonáva sa len návrat z pohľadu osi X.

Počas tejto sekvencie sa tiež nastaví stav premennej *End* na true. Vďaka nej sa ukončí v ukladačom cykle ukladanie do aktuálneho súboru. Keď sa návrat senzoru vykoná posledná sekvencia zabezpečí zmenu stavu tejto premennej späť na false, aby sa mohlo opäť správne vykonať ďalšie meranie a ukladanie.

6.4.4 Ukončenie programu (Časť 5)

Posledná časť celkovej sekvencie programu ma za úlohu ukončiť správne komunikáciu s hardvérom a nastaviť premenné do správneho stavu podobne, ako bolo opísané pri prvej sekvencii, ktorá sa vykonávala bez vedomia užívateľa.



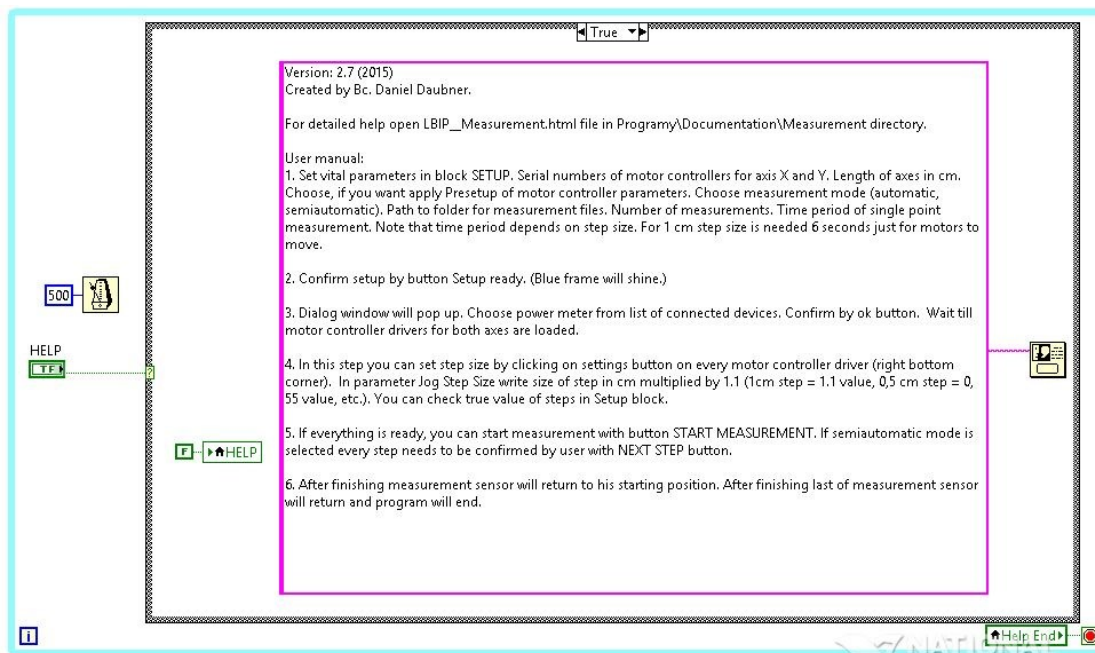
Obrázok 6.12: Blokový diagram ukončenia programu

Na obrázku 6.12 Je vyobrazená schéma použitia metódy, ktorá ukončuje komunikáciu s ovládačom a riadiacou jednotkou. Ako aj v predošlých použitíach týchto metód je na konci metódy pripojené subVI, ktoré ma za úlohu vyhodnocovať, či sa vyskytla chyba. V tejto časti je jej výstup pripojený len na indikátor chyby. V predošlých je jej ďalší výstup pripojený na blok typu OR a pomocou signálu z tohto subVI bolo možné zastaviť cyklus pohybu.

Zároveň sa v tejto sekvencii vykonáva aj ukončenie komunikácie s meračom výkonu.

6.4.5 Cyklus nápovede

V prípade, že potrebuje užívateľ pomoc pri práci s programom, môže využiť tlačidlo *HELP*. Po stlačení tohto tlačidla sa zobrazí užívateľovi dialógové okno s základnými informáciami o programe a návodu na použitie. Okrem toho každý prvok programu má svoj popis svojho účelu.

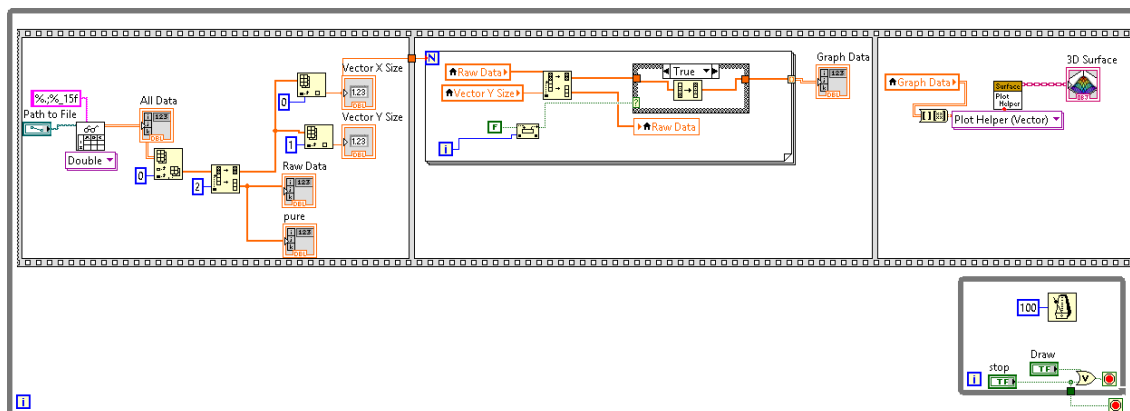


Obrázok 6.13: *Blokový diagram cyklu nápovede*

Ide o jednoduchý cyklus v ktorom sa neustále testuje stav tlačidla *HELP*. Ak bude tlačidlo zatlačené vykoná sa obsah podmienky, v opačnom prípade sa nevykoná nič. Obsahom tejto podmienky, je konštanta typu string obsahujúca dôležité informácie. Tá sa zobrazí v podobe dialógového okna s potvrdzujúcim tlačidlom *OK*.

6.5 Vizualizácia meraných dát

Doplnkom optimalizovaného programu je menší program na vizualizáciu nameraných dát, ktorý využíva prvok LabVIEW *3DSurface*. Výsledkom tohto programu je 3D graf, ktorý pochádza z súboru nameraných hodnôt.

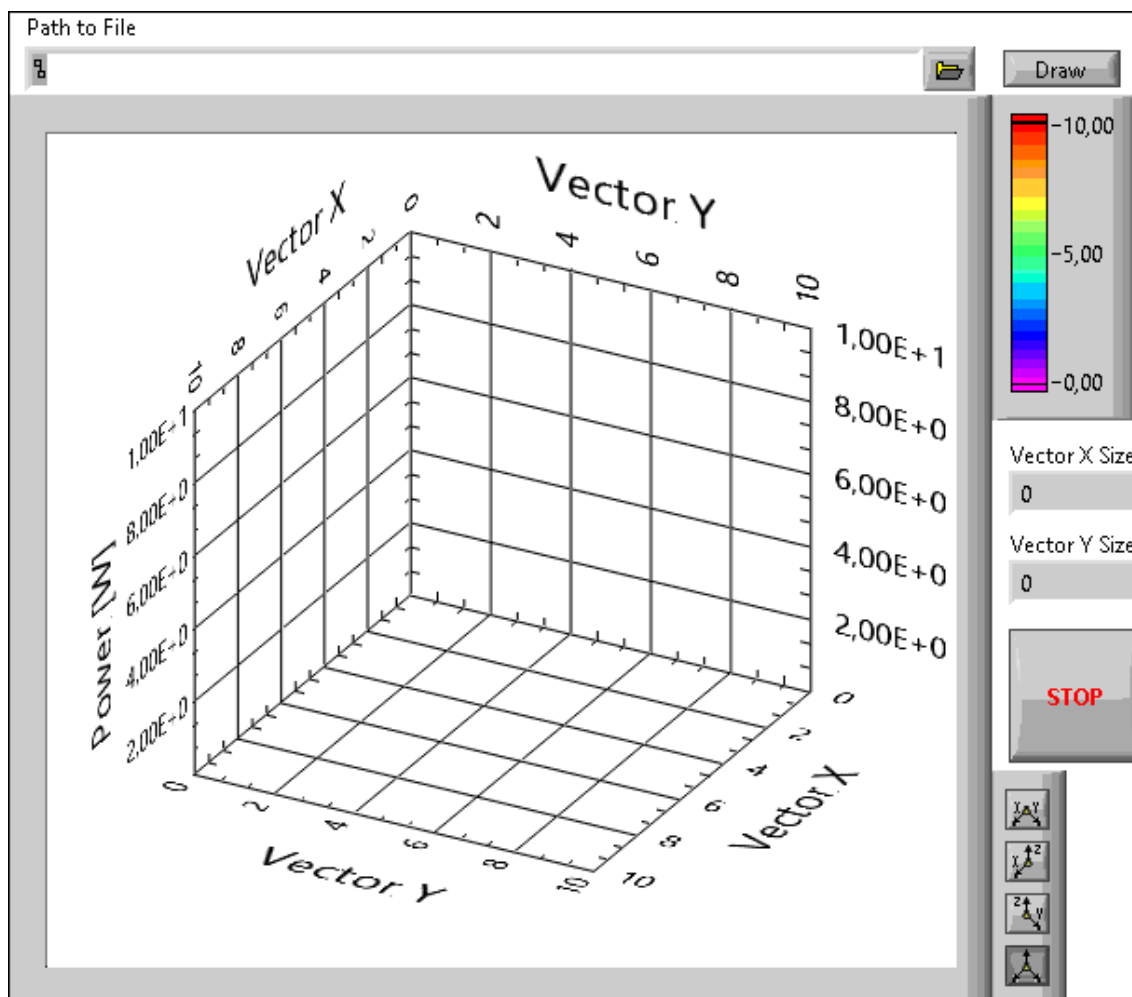


Obrázok 6.14: *Blokový diagram programu pre vizualizáciu nameraných dát*

Celý program sa vykonáva v jednom cykle, ktorý ukončuje užívateľ. Obsahom tohto cyklu je sekvenčná štruktúra, ktorá pracuje s dátami získanými zo súboru. Prvým krokom je

vyžiadať si cestu k súboru v ktorom sú dáta. Potom program spracuje informácie z hlavičky o veľkosti vektorov X a Y.

Treba brať do úvahy postup akým sa senzor pohyboval pri meraní. Kvôli tomu je nutné otočiť hodnoty každého párneho vektoru Y, čo sa vykoná v druhej sekvencií. Tato upravené dáta s odstránenou hlavičkou tvoria dvojrozmerné pole hodnôt, ktoré sa zobrazia v 3D grafe. Celý tento cyklus sa vykoná na povel užívateľa stlačením tlačidla *Draw*. Vnútorňý menší cyklus zabezpečuje čakanie na tento povel. Program sa ukončí stlačením tlačidla *Stop*.



Obrázok 6.15: Predný panel programu vizualizácie dát

Prvým krokom v behu programu je definovanie premennej hodnoty cesty. Táto cesta už musí byť zadaná priamo k požadovanému súboru. Súbor obsahuje jednu hodnotu na každom riadku samostatne. Pritom prvé dva riadky súboru tvorí hlavička, ktorá nesie informácie o veľkosti vektorov. Po načítaní súboru do jednorozmerného poľa je potrebné oddeliť hlavičku a získať z nej hodnoty vektorov X a Y. Tieto hodnoty sa zapíšu do premenných *Vector X/Y*. Jednorozmerné pole hodnôt, ktoré obsahuje už len nameraný výkon uložíme do poľa s názvom *Raw data*.

Takto rozdelené hodnoty už môžeme upravovať. Na radu prichádza druhá sekvencia programu. Jej obsahom je cyklus, ktorý ma za úlohu obrátiť poradie nameraných hodnôt u každého druhého stĺpca osi Y. Počet cyklov je určený vektorom X. Oddeľovanie hodnôt z jednorozmerného poľa sa deje podľa hodnoty vektoru Y. Pritom ako beží cyklus sa pozoruje či ide o iteráciu párnú, alebo nepárnú. Keďže cyklus sa počíta od nuly každý stĺpec, ktorého hodnoty potrebujeme otočiť, sa bude oddeľovať počas nepárnej iterácie. Ak je teda pre túto iteráciu splnená podmienka vykoná sa otočenie tejto časti poľa.

Po správnom zoradení nameraných hodnôt sa hodnoty zaznamenajú do premennej *Graph data*, ktorá je už 2D poľom. To sa v poslednej sekvencii vykreslí do 3D grafu.

7 Experimentálna časť

Cieľom experimentálnej časti je overiť meraním rozloženie intenzity zadaných laserových modulov. Sledovať reálny tvar ich zväzku spolu s pozorovaním vplyvu fluktuácií optického výkonu spôsobených teplotnými turbulenciami. V experimentálnej časti sú použité dva laserové moduly o rôznych vlnových dĺžkach (408 nm a 650 nm), dva zdroje tepla pre vplyv na zväzok a dva tvary laserových zväzkov (pôvodný a upravený), pre lepšie porovnanie výsledkov.

7.1 Popis merania

Meranie prebiehalo automaticky za pomoci použitia dvoch motorických posuvov upevnených kolmo na sebe a programu opísanému v kapitole 6. Vzhľadom na veľkosť stopy laserového zväzku bola zvolená optimálna vzdialenosť od senzoru a s ňou aj optimálna meracia plocha a krok merania. Vďaka už zabudovanej kolimačnej šošovke bol zväzok rozšírený natoľko aby sa zmestil do meranej štvorcovej plochy s stranou o dĺžke 5 cm. Pri prvotných pozorovaniach meraniach a ich výsledkoch bol zvolený krok merania 0,25 cm, vďaka ktorému je možný detailnejší náhľad na tvar zväzku.

Profil laserových zväzkov bol meraný automaticky pomocou programu LBIP_Measurement opísaný v predošlej kapitole. Po meraní bol profil vyobrazený pomocou programu Visualization.

Merač výkonu umožňuje meranie výslednej hodnoty zo vzoriek. Výsledná nameraná hodnota je potom priemerom z 300 hodnôt vzoriek zachytených meračom výkonu behom časovej periódy jednej sekundy. Limit na túto dobu danú výrobcom je 3 000 vzoriek. Počas merania je nutné manuálne na merači výkonu nastavovať meranú vlnovú dĺžku pre čo najpresnejšie meranie.

7.1.1 Meranie základného profilu LD

Za základný profil LD je považovaný profil zväzku laserového modulu, ktorý je upravovaný len kolimačnou šošovkou. Prítomnosť kolimačnej šošovky je nutná vzhľadom na citlivú plochu senzoru, ktorej priemer je 0,8 cm. V prvej časti je zmeraný základný profil oboch laserových modulov podľa postupu merania naznačený v kapitole 6.4.3 a popísaný v kapitole 7.3. Druhou časťou je rovnaké meranie, no v tomto prípade je pod priestor, ktorým prechádza zväzok umiestnený zdroj tepla. Použitý je slabší zdroj tepla, konkrétne ventilátorový ohrievač. V tretej časti sa tento zdroj tepla nahradí silnejším zdrojom tepla, elektrickým varičom, ktorý nielenže generuje vyššiu teplotu ale ohrieva aj väčšiu plochu. Cieľom tohto merania je pozorovanie základného tvaru a jeho zmien vzhľadom na zdroj tepla.

Paralelne s týmto meraním bolo uskutočnené meranie pomocou DTS systému. Vďaka nemu bolo možné zistiť nielen približnú teplotu vzduchu, ktorý ovplyvňoval zväzok, ale aj jej priestorové rozloženie. Meracie vlákno bolo umiestnené do stojanu, na štyroch stĺpoch so závitom. Preto bolo možné meniť výšku vlákna. V stojane bolo vlákno namotané

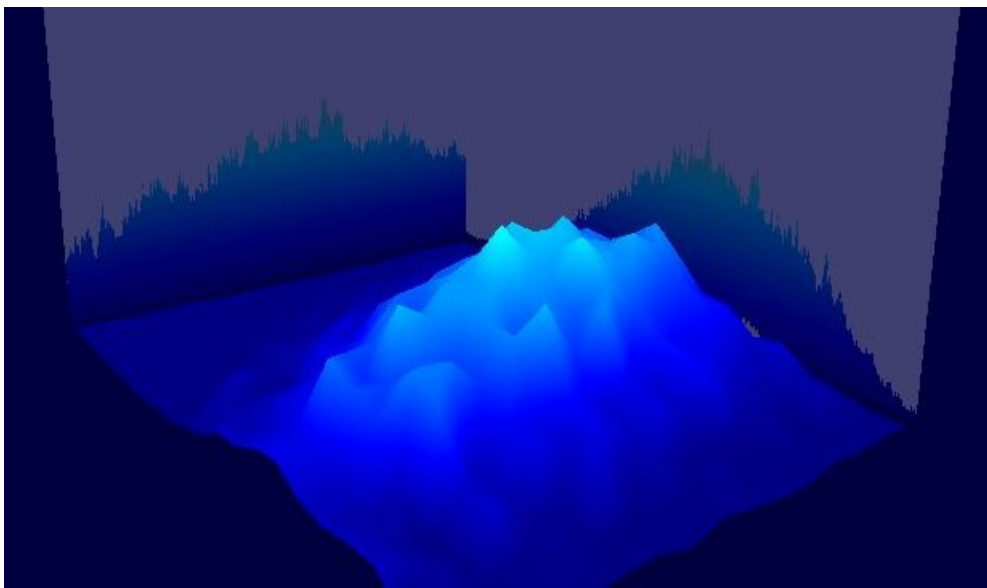
do štvorcovej sieťky krúžkov o množstve 18 krúžkov na jednej strane. Každý krúžok vlákna bol zhotovený z približne troch metrov vlákna. Preto výsledná hodnota jedného miesta v sieťky je priemerom troch hodnôt nameranej teploty. Celý stojan bolo možné umiestňovať do piatich pozícií. Vďaka niekoľko násobnému meraniu v rôznych polohách je možné zvýšiť raster merania a získať tak vo výsledku detailnejší graf.

Výstupom tohto merania sú dva typy dvoch grafov. Prvé dva grafy sú 2D grafy rozloženia intenzity. Jeden o veľkosti vektoru jednej osi 18. Druhý o veľkosti vektoru 36. Druhé grafy sú 3D grafy rozloženia tepelnej intenzity rovnako s menším a väčším rozlíšením resp. dĺžkami osových vektorov.

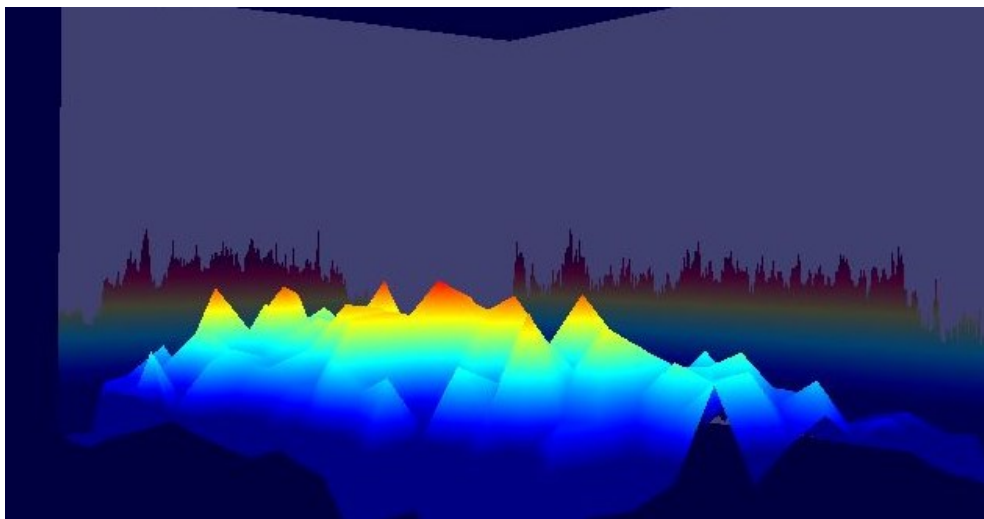
7.1.2 Meranie upraveného profilu LD

Upravenie profilu bolo inšpirované tvorbou profilu Top Hat zväzku. Ten, ako už bolo spomínané, je možné vytvoriť buď pomocou prepustenia strednej, temer rovnej časti základného profilu. Alebo pomocou dvoch plano konvexných šošoviek. Vďaka dočasne zapožičanej kamery CMOS-1201 od Cinogy Technologies bolo možné nahliadnuť priamo na tvar zväzku a určiť, ktorá metóda je reálnejšia pre tvorbu Top Hat zväzku.

V obrázku 7.1 je možno vidieť najlepší možný získaný tvar zväzku pomocou použitia dvoch plano konvexných šošoviek. Obrázok 7.2 zobrazuje 3D tvar zväzku, ktorý je získaný metódou prepustenia stredu Gaussovho zväzku cez priezor.



Obrázok 7.1: *Tvar zväzku po použití dvoch plano konvexných šošoviek*



Obrázok 7.2: *Tvar zväzku po použití priezoru*

Ako je možné vidieť na obrázkoch, ani jeden z profilov neodpovedá profilu Top Hat. Vzhľadom na prierezy je ale plochejší práve zväzok, ktorý bol získaný pomocou priezoru. Pri pohľade na prierezy ôs si môžeme všimnúť že zväzok obrázka 7.2 má taktiež prudšie stúpanie intenzity. To sú hlavné dôvody, prečo bola zvolená v meraní táto úprava zväzku.

Pri experimentálnom meraní ale v prípade upraveného zväzku bola použitá aj druhá kolimačná šošovka z práve nepoužívaného laserového modulu. Vďaka použitiu dvoch šošoviek je možné ešte viac rozšíriť pôvodný zväzok a získať tak čo najviac plochú časť z jeho stredu. Hoc tento zväzok má prudšie stúpanie a je plochejší, stále nemôže byť nazývaný Top Hat zväzkom, pretože má určité nerovnosti resp. špičky. Tie sú spôsobené nižšou kvalitou laserových modulov, presnejšie ich kolimačných šošoviek. Aj voľným okom, pri rozšírení zväzku je možné pozorovať vzor na odraze stopy spôsobené ich brúsením, drobné poškodenia a drobné nečistoty, ktoré už nebolo možné odstrániť. Tieto vlastnosti sa prejavovali nesúmernou textúrou dopadajúceho svetelného bodu.

Kombinácia týchto vlastností laserových modulov spolu s obmedzeným množstvom typov plano konvexných šošoviek na školskom sklade je tiež hlavným dôvodom, prečo výsledný profil na obrázku 7.1 je viac podobný Gaussovmu profilu, než profilu Top Hat.

Aj napriek všetkým komplikáciám a nemožnosti realizácie profilu Top Hat je možné získať upravený zväzok z pôvodného eliptického Gaussovho zväzku. Ten má prudšie stúpanie intenzity. Jeho tvar je síce nesúmerný, no plochejší a preto takto získaný zväzok je vhodným zväzkom pre porovnanie vlastností, tvaru a vplyvu teplotných zmien.

7.2 Použité zariadenia a software

V tejto podkapitole môžete nájsť zoznam použitých zariadení a softvéru. Kategorizované podľa typu merania. Nevyhnutné zariadenia pre každé meranie profilu laserového zväzku sú:

- Laserový modul LD 408 nm s eliptickým profilom zväzku
- Laserový modul LD 650 nm s eliptickým profilom zväzku
- Zdroj napätia BK127
- Merač výkonu Thorlabs PM100D
- Senzor výkonu Thorlabs S120C, 400 – 1100 nm
- Riadiaca jednotka krokového posuvu Thorlabs APT T-Cube
- Motorický posuv Thorlabs NRT150M
- Optomechanické komponenty (koľajnica, držiaky, priezor, atd.)
- Počítač s operačným systémom Windows

Pri meraní bol použitý osobný notebook s operačným systémom Windows 8. Pre realizáciu merania je ale možné použiť aj iný počítač s OS Windows, no musí obsahovať nasledovné programy a ovládače:

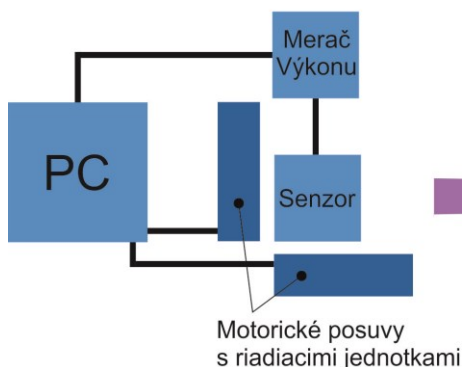
- Program LBIP_Measurement
- Program Visualization
- Ovládač PM100D-PM200 Utility 4.91
- Ovládač APT USB
- Ovládač NI VISA 1401

V prípade ovplyvňovania zväzku boli použité dva zdroje tepla. Elektrický varič Sencor SCP2250 a ventilátorový ohrievač Empire CTH - 5000. Teplota získaná z týchto zdrojov bola overovaná ortuťovým teplomerom v kombinácii s DTS systémom s vláknom SM Cordage Pro-000-366.

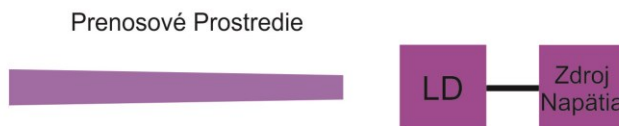
7.3 Schémy meraní

Na obrázku 7.3 je znázornená základná bloková schéma merania. Táto schéma je najvhodnejšia pre meranie profilu laserového zväzku bez vplyvov.

Prijímací systém



Vysielací systém

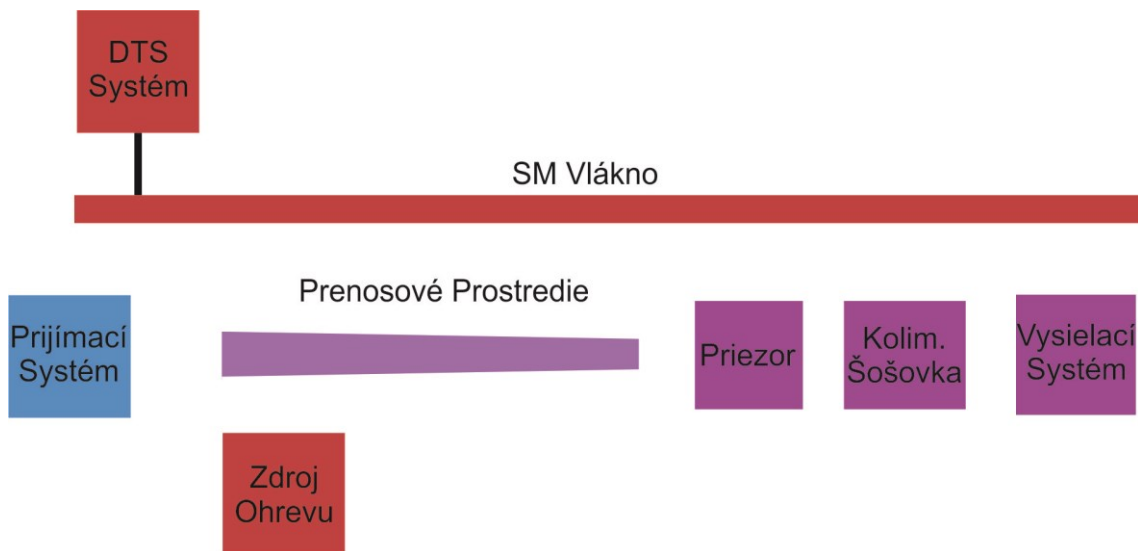


Obrázok 7.3: Základná schéma merania

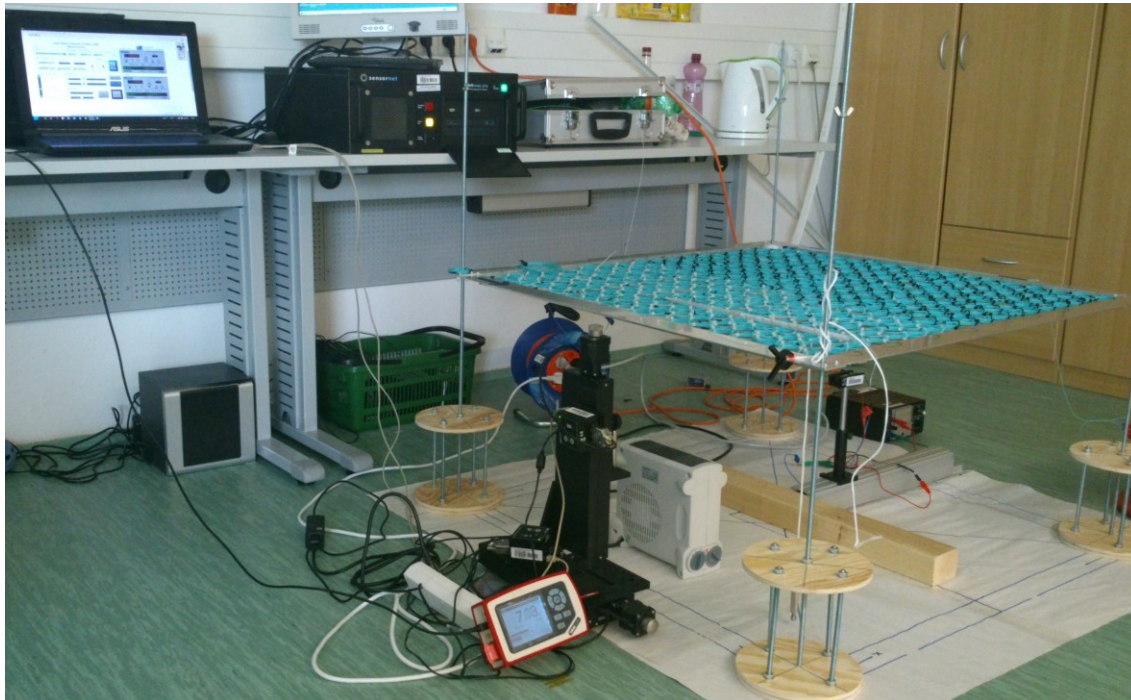
V prípade zakomponovania teplotných vplyvov do merania musí byť do tejto schémy umiestnený zdroj ohrevu medzi zdroj laserového svetla a senzor. Schéma s obsahnutím tohto

prvku je v obrázku 7.4. V ňom je do schémy doplnená aj časť optomechanických komponentov pre úpravu pôvodného laserového zväzku. V rozšírenej schéme merania je okrem zdroja ohrevu umiestnený aj DTS systém, ktorý bol použitý na meranie rozloženia intenzity tepla.

Na obrázku 7.5 je možné vidieť fotografiu pracoviska, kde je reálne zostavená celá schéma kompletného merania. Ostatné fotky reálne zapojenej schémy a merania je možné nájsť v prílohe C.



Obrázok 7.4: Rozšírená schéma merania



Obrázok 7.5: Fotografia meracieho pracoviska

7.4 Postup merania

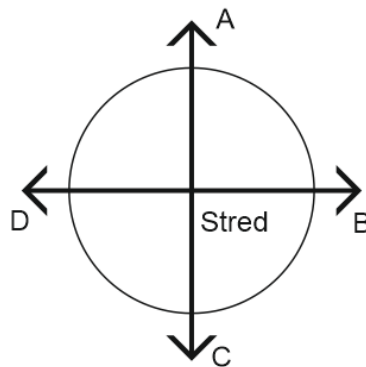
Celý postup merania je možné zhrnúť do niekoľkých špecifických bodov. Meranie pôvodného a upraveného zväzku sa líšia len minimálne a je možné aplikovať rovnaký postup s aplikáciou rozdielov. Jedinými rozdielmi je iná schéma merania (podľa obrázka 7.4) a nastavenie dĺžky meraných osí na 2,5 cm.

1. Zapojíme a umiestnime zariadenia podľa schémy merania vyobrazenej na obrázku 7.3. Zaznamenajte si vzdialenosti jednotlivých zariadení. Fyzicky nastavte potrebnú meranú vlnovú dĺžku na merači výkonu.
2. Spustíte program LBIP_Measurement, nastavte potrebné hodnoty pre meranie s dĺžkou meranej osi X 5 cm a osi Y tiež 5 cm. Krok merania zvolíte 0,25 cm. Počet vzoriek do priemeru meranej veličiny nastavte na 300. Počet celkových meraní je 5. Zvoľte vhodnú cestu pre ukladanie súborov.
3. V prípade merania s tepelným vplyvom umiestnite medzi svetelný zdroj a detektor zdroj tepla a to tak, aby svetelný lúč nemal žiadnu viditeľnú prekážku pred detektorom a aby zdroj ohrevu bol pod predpokladanou trasou svetelného lúča. Zaznamenajte si intenzitu ohrevu a vzdialenosti od ostatných prvkov merania.
4. Spustíte meranie programu tlačidlom *Start Measurement*.
5. Po skončení merania spustíte program Visualization, zvolíte požadovaný súbor nameraných hodnôt a vykreslíte graf stlačením tlačidla *Draw*.

V určitých meraniach bolo paralelne uskutočnené meranie pomocou systému DTS, ktoré malo svoj vlastný postup a nebolo by vhodné tento postup miešať s postupom merania profilu laserového zväzku.

1. Zapojte a umiestnite zariadenia systému DTS podľa časti schémy 7.4 (červené bloky). Zaznamenajte si vzdialenosti vlákna zapojeného do DTS od zdroja ohrevu.
2. Spustíte meranie DTS systému, ktorého výstupom sú súbory typu .ddf.
3. Po zaznamenaní nameraných referenčných súborov zapnite zdroj ohrevu.
4. Umiestnite stojan s optickým vláknom na pozíciu Stred.
5. Po dobu približne desiatich minút spustíte meranie DTS systému.
6. Uložte si namerané súbory do zložky s adekvátnym názvom pre danú pozíciu stojana s vláknom.
7. Opakujte body 4 až 6 pre polohy A, B, C a D, podľa obrázka 7.6.

Na obrázku 7.6 nižšie, je možné vidieť vyznačenie polôh pre stojan s vláknom DTS systému. Každá z polôh (A - D) je od stredu vzdialená 2,5 cm. Počas merania určenie polôh bolo kontrolované pozíciou stĺpov stojana a kyvadla.

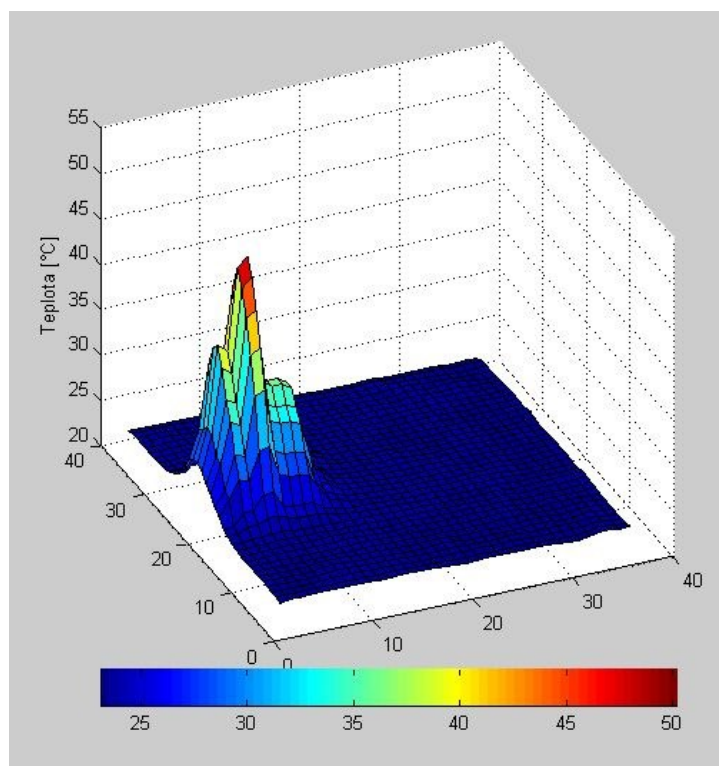


Obrázok 7.6: *Vyznačenie polôh pre stojan s vláknom*

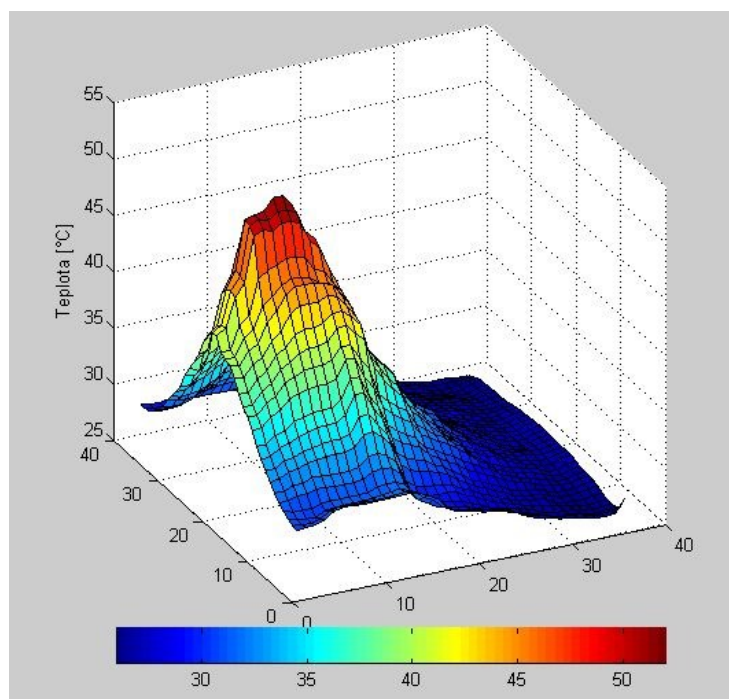
7.5 Výsledky merania

Táto podkapitola sa venuje výsledkom meraní experimentálnej časti. V úvode každej podkapitoly sú informácie o polohách a vzdialenostiach jednotlivých prvkov merania v prenosovom prostredí a veľkosti napätia na zdroji napätia pripojenom k laserovému modulu. Po týchto informáciách nasledujú reprezentatívne grafy jednotlivých meraní. Ostatné 4 namerané grafy, ktorých opis bude spomenutý vo výsledkoch sú umiestnené v prílohe D spolu s dvojrozmernými grafmi z pohľadu osi X a Y v prílohe E. Každá nameraná hodnota bola znížená o parazitný výkon zaznamenaný pri meraní. Tabuľky parazitných výkonov možno nájsť v prílohe G. Po nich sú vo výsledkoch uvedené tabuľky s hodnotami špičkového výkonu a rozmermi zväzkov.

Každý zväzok, či už základný alebo upravený čelil rovnakému ovplyvňovaniu a teda rovnakému rozloženiu teploty z zdrojov ohrevu. V obrázku 7.7 a 7.8 je možné vidieť rozloženie intenzity tepla pochádzajúceho z použitých zdrojov. Oba zdroje ohrevu boli umiestnené tak aby ich vzdialenosť od vlákna DTS systému bola 27,8 cm.



Obrázok 7.7: *Graf rozloženia intenzity teploty ventilátorového ohrievača*

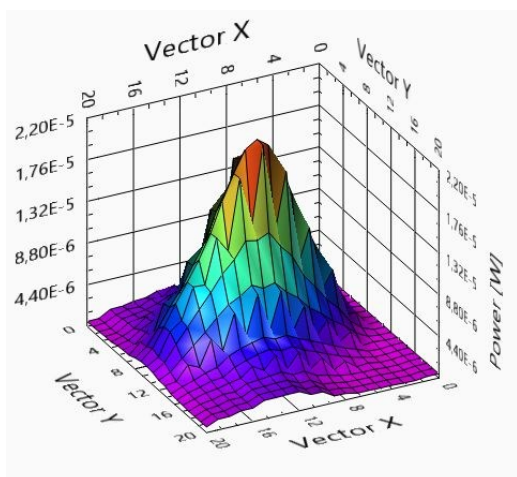


Obrázok 7.8: *Graf rozloženia intenzity teploty elektrického variča*

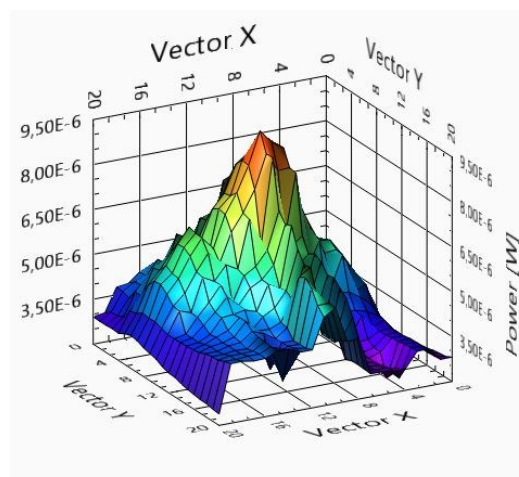
7.5.1 Výsledky merania základného profilu LD

Vzdialenosť medzi laserovým modulom a senzorom bola 60 cm pri každom meraní základného profilu. V prípade použitia zdroja ohrevu bol tento zdroj umiestnený do vzdialenosti 11 cm od senzoru. Meraná plocha zväzku bola vo výške približne 30 cm. Plocha zdroja tepla ohrievačov bola vo výške 21 cm nad zemou. Veľkosť napätia na zdroji pripojenom k LD bola 4,6 V.

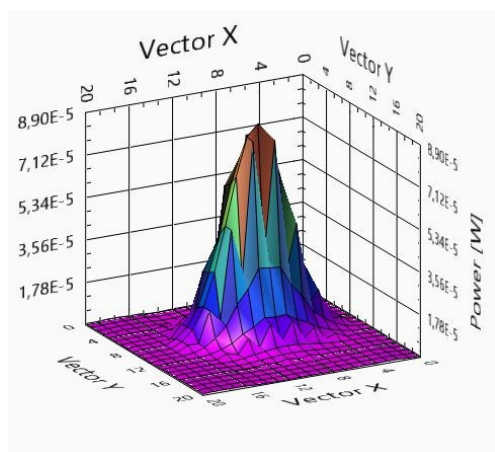
Reprezentatívne tvary zväzkov meraní sú v obrázkoch 7.9 až 7.14. V názvoch grafov je spomenutý aj časť názvu súboru, podľa ktorého je možné ho dohľadať v elektronickej prílohe.



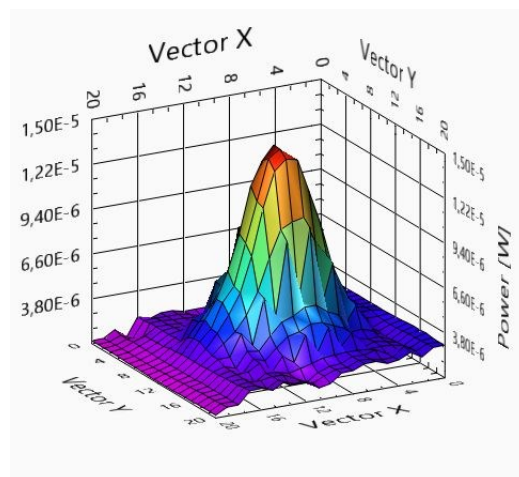
Obrázok 7.9: 3D profil základného zväzku LD s λ 408 nm bez vplyvu (14-49-30)



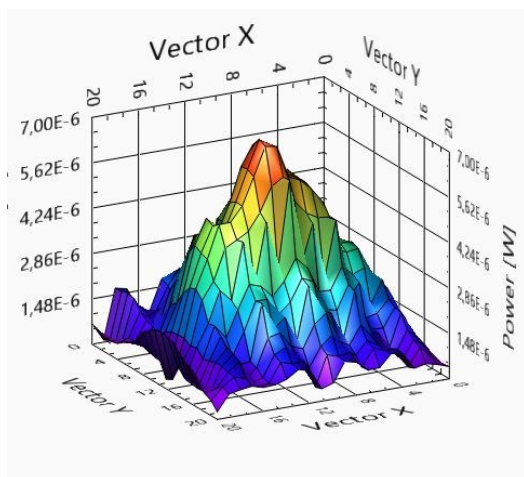
Obrázok 7.11: 3D profil základného zväzku LD s λ 408 nm s vplyvom ventilátorového ohrievača (15-20-52)



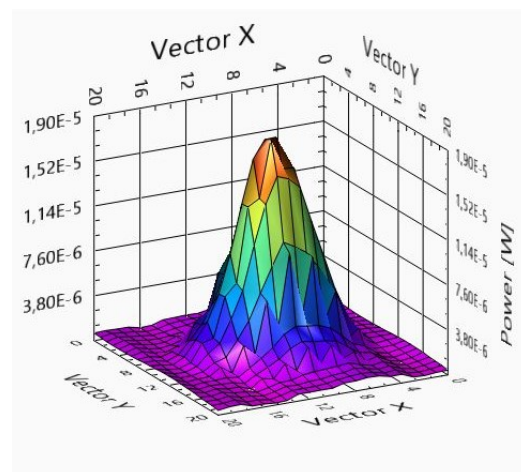
Obrázok 7.10: 3D profil základného zväzku LD s λ 650 nm bez vplyvu (10-36-02)



Obrázok 7.12: 3D profil základného zväzku LD s λ 650 nm s vplyvom ventilátorového ohrievača (12-04-56)



Obrázok 7.13: 3D profil
základného zväzku LD s λ 408 nm
s vplyvom elektrického variča (14-13-07)



Obrázok 7.14: 3D profil
základného zväzku LD s λ 650 nm
s vplyvom elektrického variča (11-46-28)

Tabuľky 7.1 až 7.6 obsahujú hodnoty špičkových výkonov, elipticitu zväzkov priradenú k jednotlivým súborom nameraných hodnôt a parameter FWHM z pohľadu osí X a Y. Parameter FWHM je parameter popisujúci šírku zväzku v mieste polovičky maximálneho optického výkonu. Elipticita zväzku je vzdialenosť najmenších protiahlych výkonov z pohľadu konkrétnej osi. Najmenšie výkony sú tie výkony, ktoré sa nachádzajú v spodnej hranici zväzku a je ich ešte možné považovať za výkony patriace zväzku.

Súbor	Maximálny výkon [μ W]	Elip. zväzku X [cm]	Elip. Zväzku Y [cm]	FWHM osi X [cm]	FWHM osi Y [cm]
13-48-45	22,11	4,00	2,25	2,25	1,50
14-19-06	22,94	4,00	2,25	2,25	1,50
14-49-30	21,91	4,00	2,25	2,25	1,50
15-19-54	22,38	4,00	2,25	2,25	1,50
15-50-18	22,79	4,00	2,25	2,25	1,50

Tabuľka 7.1: Tabuľka hodnôt vybraných veličín bez vplyvu laserového modulu 408 nm

Súbor	Maximálny výkon [μ W]	Elip. Zväzku X [cm]	Elip. Zväzku Y [cm]	FWHM osi X [cm]	FWHM osi Y [cm]
10-05-39	82,21	3,00	1,75	1,50	1,25
10-36-02	88,95	3,00	1,75	1,50	1,25
11-06-26	89,59	3,00	1,75	1,50	1,25
11-36-50	88,70	3,00	1,75	1,50	1,25
12-07-14	89,41	3,00	1,75	1,50	1,25

Tabuľka 7.2: Tabuľka hodnôt vybraných veličín bez vplyvu laserového modulu 650 nm

Všetky merania základného profilu boli uskutočnené s rovnakými podmienkami popísanými v podkapitolách vyššie. Prvými meraniami bola snaha nazrieť na rozloženie svetelného výkonu zväzku bez akéhokoľvek vplyvu z konkrétneho zdroja ohrevu.

V prípade fialového laserového modulu (408 nm) môžeme vo výsledných grafoch pozorovať súmerný eliptický tvar Gaussovho zväzku. V každom zmeranom profile si môžeme všimnúť pravidelné nerovnosti, na prvý pohľad podobné vrúbkovaniu. Ich výskyt je spôsobený nedokonalosťami kolimačnej šošovky laserového modulu. Prejav týchto nedokonalostí bolo pri meraní možné pozorovať aj voľným okom na odraze stopy zväzku. V porovnaní ostatných grafov je vidieť mierne zmeny tvaru v rôznych častiach zväzku. Ide o miernu deformáciu špičky profilu 14-19-06 a deformáciu stúpania výkonu jednej z širších strán zväzku 15-19-54. Okrem týchto dvoch deformácií sú ostatné časti meraných profilov veľmi podobné. Výskyt týchto miernych deformácií dokazuje, že k stále dochádza k fluktuáciám indexu lomu vzduchu v atmosférickom prostredí. Je taktiež potrebné si uvedomovať prítomnosť rozptylu svetelného lúča spôsobenú nehomogenitou vzduchu. U tohto typu merania malo ohraničenie zväzku rovnaké rozmery, neboli pozorované žiadne extrémnejšie zmeny tvaru zväzku.

V prípade merania bez priameho vplyvu u červeného laserového modulu (650 nm) je možné hovoriť o rovnakých záveroch ako u fialového modulu. V tomto prípade sú vzájomné tvary zväzkov viac podobnejšie, temer až rovnaké. K jedinej menšej deformácii špičky došlo v prípade tvaru 10-05-39. Dôvod prečo sú profily zväzkov u tohto modulu viac podobnejšie je ich vyšší optický výkon. Hoc zdroj napätia bol nastavený u oboch modulov rovnako (4,6 V). Červený modul má lepšiu konverziu elektrického výkonu na optický a vďaka tomu tvar zväzku lepšie odoláva okolitým drobným fluktuáciám a rozptylu. Vďaka deformácii špičky v jednom z meraní je rozdiel špičkových výkonov $1,65 \mu\text{W}$ a u fialového modulu $1,03 \mu\text{W}$. Pri detailnejšom pozorovaní celých tvarov zväzku je možné považovať tvar zväzku červeného modulu u tohto merania za stabilnejší.

Súbor	Maximálny výkon [μW]	Elip. zväzku X [cm]	Elip. zväzku Y [cm]	FWHM osi X [cm]	FWHM osi Y [cm]
11-03-28	15,44	2,75	2,00	1,75	1,50
11-34-12	13,32	2,75	2,25	1,75	1,50
12-04-56	14,13	3,00	2,50	1,75	1,50
12-35-40	14,16	3,25	2,75	1,75	1,50
13-06-24	15,85	3,00	2,75	1,75	1,50

Tabuľka 7.3: *Tabuľka hodnôt vybraných veličín s vplyvom ventilátorového ohrievača laserového modulu 408 nm*

Súbor	Maximálny výkon [μW]	Elip. zväzku X [cm]	Elip. zväzku Y [cm]	FWHM osi X [cm]	FWHM osi Y [cm]
09-56-02	8,09	4,00	3,00	3,25	2,25
10-26-24	8,18	4,25	2,50	2,75	2,25
13-48-41	9,39	4,00	2,75	3,00	2,00
15-20-52	9,48	4,25	3,00	2,25	3,00
15-51-36	6,43	3,75	2,50	2,75	2,00

Tabuľka 7.4: *Tabuľka hodnôt vybraných veličín s vplyvom ventilátorového ohrievača laserového modulu 650 nm*

Prvé meranie s vplyvom zdroja ohrevu bolo uskutočnené s ventilátorovým ohrievačom. Úroveň ohrevu bola nastavená na maximálnu hodnotu. Prúdenie teplého vzduchu zabezpečoval ventilátor, ktorý bol nastavený na prvý výkonový stupeň. Takéto nastavenie bolo použité u každého merania s týmto typom vplyvu.

U fialového laserového modulu je možné na prvý pohľad vidieť výrazný pokles intenzity a výraznú deformáciu zväzku. Najväčší rozdiel špičkových výkonov je 16,51 μW teda strata až 72 % výkonu. Každý jeden z meraných zväzkov a iný tvar a výrazné deformácie. Najväčší rozdiel špičkových výkonov tohto merania je 3,05 μW . Dá sa všimnúť aj rozšírenie, či dokonca aj zúženie širok tvaru zväzku. Z pohľadu širšej strany eliptického zväzku dochádzalo viac k udržaniu šírky, či rozšíreniu zväzku o jeden krok. V prípade zväzku 15-50-18 je vidieť zúženie na tejto ose. Toto meranie má zároveň najnižší optický výkon. Hranice tohto eliptického zväzku sa pri takejto strate zmiešali s optickým šumom, čo v dôsledku vyzerá ako zúženie priemeru zväzku. Zväzok samotný je ale na prvý pohľad širší a objemnejší, než zväzky merané bez vplyvu tepelného zdroja. Dôkazom je aj rozšírenie zväzku z pohľadu parametru FWHM.

K veľmi podobným zmenám v tvare zväzku došlo aj v prípade červeného laserového modulu. Aj tu je vidieť, nárast objemu v tvare zväzku spolu s zmenou ohraničenia. Zaujímavým faktom je úbytok výkonu u tohto modulu. Najväčší rozdiel medzi špičkovými výkonmi je až 76,27 μW , teda až 85 % výkonu. Rozdiely medzi špičkami samotného merania je 2,53 μW . Čo je výraznejší úbytok výkonu než u fialového modulu.

Súbor	Maximálny výkon [μW]	Elip. zväzku X [cm]	Elip. zväzku Y [cm]	FWHM osi X [cm]	FWHM osi Y [cm]
12-04-04	7,63	3,50	2,75	2,75	2,00
12-34-28	6,92	3,75	2,75	2,50	2,00
13-04-52	6,43	3,75	3,25	2,75	2,00
13-35-16	7,00	3,75	3,00	2,75	2,25
14-13-07	6,83	3,75	2,50	3,00	2,00

Tabuľka 7.5: *Tabuľka hodnôt vybraných veličín s vplyvom elektrického variča laserového modulu 408 nm*

Súbor	Maximálny výkon [μW]	Elip. zväzku X [cm]	Elip. zväzku Y [cm]	FWHM osi X [cm]	FWHM osi Y [cm]
10-37-04	18,15	3,25	2,50	1,50	1,25
11-16-06	19,80	3,25	2,50	1,75	1,25
11-46-28	18,51	3,00	2,50	1,75	1,50
12-16-52	18,35	3,00	2,50	1,50	1,25
12-47-16	18,47	3,25	2,50	1,50	1,25

Tabuľka 7.6: *Tabuľka hodnôt vybraných veličín s vplyvom elektrického variča laserového modulu 650 nm*

Druhým a posledný použitým zdrojom ohrevu bol elektrický varič. U tohto bola pri každom meraní použitá väčšia platnička nahriata na maximálny stupeň. Je dobré uvedomiť

si, že v prípade tohto zdroja ohrevu ohriaty vzduch pozvoľne stúpá nahor, bez podpory ventilátoru.

Fialový laserový modul mal väčšiu stratu výkonu oproti meraniu bez tepelných vplyvov. Aj napriek tomu, že najväčší rozdiel medzi výkonmi je rovnaký ako pri vplyve ventilátorového ohrievača, no špičky ostatných meraní v tomto prípade sú menšie, než pri predošlom vplyve. Rozdiel výkonu špičiek zväzku je preto menší, presne $1,2 \mu\text{W}$. V každom z prípadov je možné u širšej časti pozorovať zúženie zväzku, kvôli strate okrajového výkonu zväzku v šume. Opäť pri pohľade na užší priemer zväzku a celkový tvar vidím väčší objem a nárast šírky zväzku. Deformácie častí zväzku sa vyskytli aj v tomto prípade, no oproti predošlému meraniu je vidieť, že tvar zväzku sa menil menej.

Červený laserový modul ukázal iné výsledky. Pokles špičkových výkonov bol o niečo málo menší, než v predošlom meraní. Najväčším rozdielom výkonov je $71,44 \mu\text{W}$, čo je 79,74 %. Rozdiely medzi špičkovými výkonmi tohto merania bol tiež menší ($1,65 \mu\text{W}$). Deformácie častí zväzku neboli tak rozdielne a výrazné ako v predošlom meraní. V každom z prípadov je možné pozorovať rozšírenie zväzku a ani v jednom nenastala strata okrajov zväzku v svetelnom šume.

U oboch laserových modulov môžeme opäť sledovať nárast parametru FWHM, ktorý potvrdzuje rozšírenie zväzku.

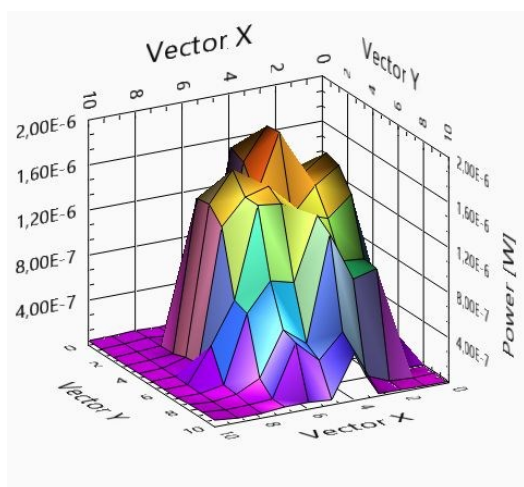
7.5.2 Výsledky merania upraveného profilu LD

Vzdialenosť medzi priezorom a senzorom bola 38 cm pri každom meraní základného profilu. Priezor samotný bol kruhového tvaru s priemerom 5 mm. Vzďialenosť priezoru od druhej kolimačnej šošovky bola 13,5 cm a vzdialenosť šošovky od laserového modulu bola 3 cm. Výsledná vzdialenosť laserového modulu od senzoru je preto 54,5 cm. Táto vzdialenosť je mierne rozdielna od vzdialenosti meraní základného profilu, a to kvôli získaniu čo najvhodnejšieho upraveného profilu intenzity laserového zväzku. V prípade použitia zdroja ohrevu bol tento zdroj umiestnený do vzdialenosti 11 cm od senzoru. Meraná plocha zväzku bola vo výške približne 30 cm. Plocha zdroja tepla ohrievačov bola vo výške 21 cm nad zemou. Veľkosť napätia na zdroji pripojenom k LD bola 5,3 V.

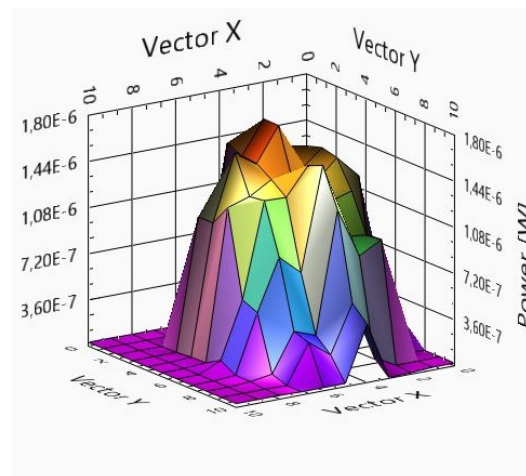
V obrázkoch 7.15 až 7.21 je možno vidieť výsledné tvary profilov zväzku jednotlivých meraní. Užitočné hodnoty k týmto grafom sú zaznamenané v tabuľkách 7.7 až 7.10. Parameter hranice zväzku udáva vzdialenosť najnižších protiľahlých hodnôt výkonu zväzku, ktoré sa dajú považovať za výkon zväzku.

U fialového laserového modulu bolo meranie vplyvov uskutočnené tesne za sebou. V prípade červeného modulu bolo zrealizované najprv meranie základného profilu a potom meranie s vplyvom ventilátorového ohrievača. Druhé zrealizované meranie s vplyvom elektrického variča bolo uskutočnené v inú dobu. To znamená, že bolo nutné opäť zostaviť pracovisko. Každý upravený zväzok, vďaka nedokonalostiam kolimačnej šošovky, mal inú textúru, ktorú bolo možné vidieť aj voľným okom na odraze stopy zväzku. Pri takom rozšírení zväzku druhou kolimačnou šošovkou je prakticky nemožné nájsť presne rovnakú časť stopy

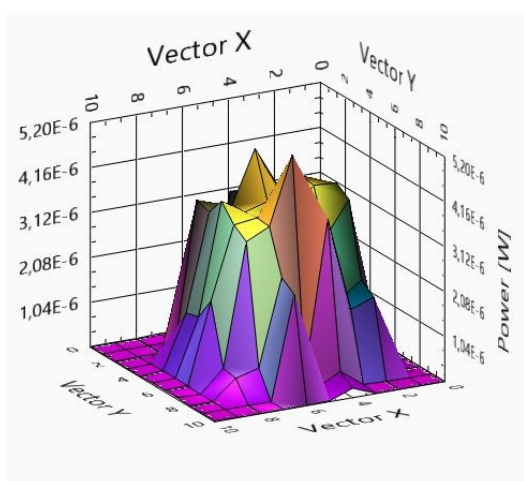
s rovnakou textúrou. Preto u tohto modulu bolo doplnené druhé meranie profilu bez vplyvu zdroja ohrevu.



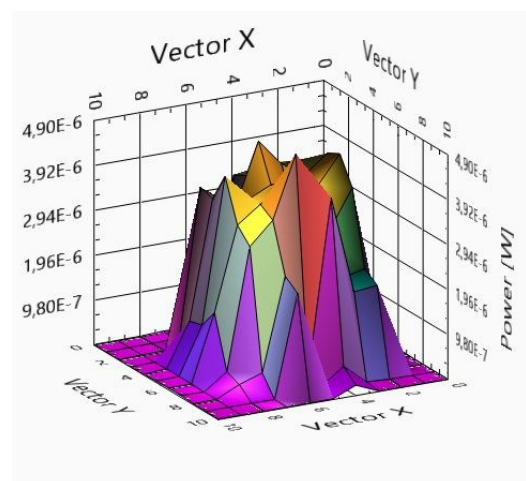
Obrázok 7.15: 3D profil upraveného zväzku LD s λ 408 nm bez vplyvu (13-25-00)



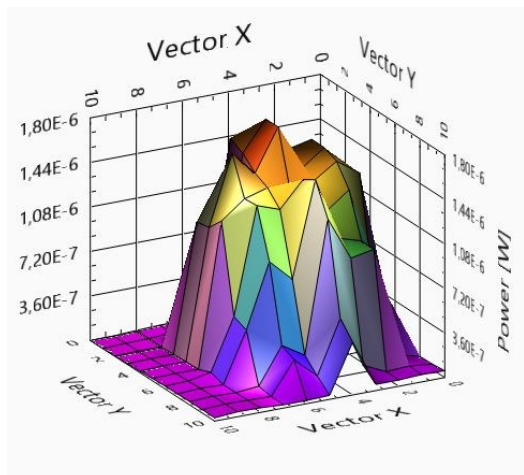
Obrázok 7.17: 3D profil upraveného zväzku LD s λ 408 nm s vplyvom ventilátorového ohrievača (11-27-37)



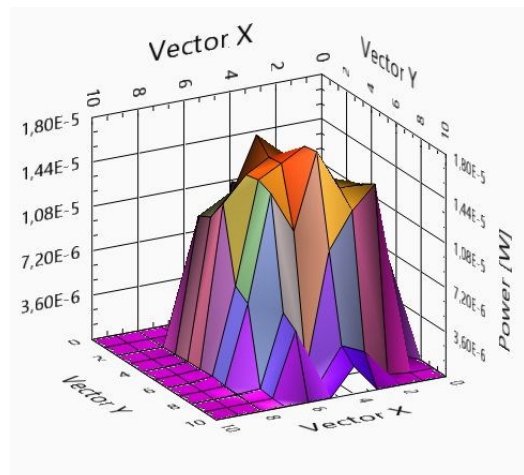
Obrázok 7.16: 3D profil upraveného zväzku LD s λ 650 nm bez vplyvu (10-31-59)



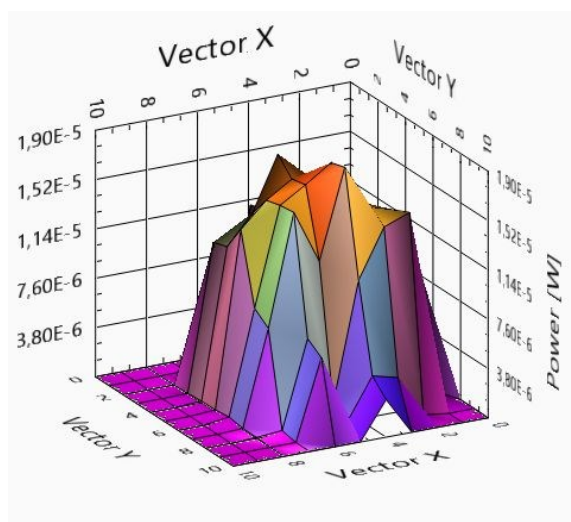
Obrázok 7.18: 3D profil upraveného zväzku LD s λ 650 nm s vplyvom ventilátorového ohrievača (09-34-39)



Obrázok 7.19: 3D profil upraveného zväzku LD s λ 408 nm s vplyvom elektrického variča (12-30-32)



Obrázok 7.20: 3D profil upraveného zväzku LD s λ 650 nm s vplyvom elektrického variča (14-30-40)



Obrázok 7.21: 3D profil upraveného zväzku LD s λ 650 nm bez vplyvu(15-19-08) k textúre obrázku 7.20

Súbor	Maximálny výkon [μ W]	Hranice zväzku [cm]	FWHM [cm]
11-27-37	1,95	2,00	1,75
11-36-10	1,93	2,00	1,75
11-44-42	1,89	2,00	1,75
11-53-14	1,88	2,00	1,75
12-01-46	1,87	2,00	1,75

Tabuľka 7.7: Tabuľka hodnôt vybraných veličín upraveného zväzku 408 nm bez vplyvu

Vplyv elektrického variča				Vplyv ventilátorového ohrievača			
Súbor	Maximálny výkon [μW]	Hranice zväzku [cm]	FWHM [cm]	Súbor	Maximálny výkon [μW]	Hranice zväzku [cm]	FWHM [cm]
12-30-32	1,78	2,00	1,75	13-25-00	1,72	2,00	1,75
12-39-06	1,76	2,00	1,75	13-34-06	1,71	2,00	1,75
12-47-38	1,74	2,00	1,75	13-42-38	1,72	2,00	1,75
12-56-10	1,73	2,00	1,75	13-51-10	1,71	2,00	1,75
13-04-42	1,75	2,00	1,75	13-59-42	1,71	2,00	1,75

Tabuľka 7.8: Tabuľka hodnôt vybraných veličín upraveného zväzku 408 nm s vplyvom teploty

Meranie profilu zväzku fialového laserového modulu bez vplyvu zdroja ohrevu ukázalo temer rovnaké tvary zväzku v každom z meraní. Rozdiel medzi špičkovými výkonmi je 0,08 μW . Vďaka kruhovému priezoru išlo už o kruhový typ profilu, preto pri vyhodnocovaní bol pozorovaný priemer zväzku. Ten bol vo všetkých prípadoch tohto merania rovnaký. Vzhľadom na menšiu veľkosť stopy bolo možné zmenšiť meraciu plochu a teda aj skrátiť dobu merania. Upravený zväzok je na prvý pohľad strmší. Nerovnomerné špičky zväzku sú spôsobené nedokonalosťami kolimačnej šošovky modulu. Napriek tomu je možné opätovne namerať tieto špičky a teda stály tvar.

Po ovplyvnení zväzku ventilátorovým ohrievačom môžeme vidieť zmeny v tvare zväzku. Nielenže majú špičky nižšiu intenzitu oproti meraniu bez vplyvu, ale ich tvar je deformovaný. Časti zväzku, ktoré boli bez vplyvu vnímané ako ostrejšie skoky sú ešte ostrejšie. Naopak časti, ktoré boli plochejšie sa viac zaoblili. Tvar sa zmenil no počas celej doby merania si svoju podobu držal. Každý nameraný profil je podobným ekvivalentom ďalších štyroch. Vďaka prudkému stúpaniu intenzity na okrajoch zväzku nenastala žiadna výrazná zmena v priemere zväzku, ktorú by bolo možno pozorovať zvoleným krokom 0,25 cm. Podľa vizuálneho posúdenia nie je možné jednoznačne povedať, že by došlo k nárastu objemu zväzku v akejkoľvek jeho časti. Najväčší pokles výkonu špičky bol 0,22 μW čo je strata 11,28 %. Najväčší rozdiel maximálnej špičky v samotnej sérii merania je 0,05 μW .

Ovplyvnenie zväzku elektrickým varičom malo za dôsledok o niečo málo väčšiu stratu výkonu špičky (0,24 μW). Percentuálne 12,31 % strata. Priemer aj hranice zväzku ostali rovnaké, nenastali žiadne výrazné zmeny. U tohto zväzku je ale možné sledovať mierne rozšírenie zväzku. To je ale menšie, než veľkosť jedného kroku merania. Jeho strmosť je približne rovnaká ale vo vyšších častiach je voľným okom všimnuteľný mierne rozšírenie. U tohto merania sa hrany zväzku zaostřili a to aj na plochejších miestach zväzku. Tento zväzok je nielenže menej deformovaný ale udržiava si aj lepšie svoj tvar. Rozdiely špičkových výkonov vzájomných meraní rovnakého vplyvu sú len 0,01 μW .

Bez vplyvu				Vplyv ventilátorového ohrievača			
Súbor	Maximálny výkon [μW]	Hranice zväzku [cm]	FWHM [cm]	Súbor	Maximálny výkon [μW]	Hranice zväzku [cm]	FWHM [cm]
10-23-27	5,20	2,00	1,75	09-34-39	4,86	2,00	1,75
10-31-59	5,20	2,00	1,75	09-43-11	4,92	2,00	1,75
10-40-31	5,22	2,00	1,75	09-51-43	4,96	2,00	1,75
10-49-03	5,22	2,00	1,75	10-00-15	4,99	2,00	1,75
10-57-35	5,23	2,00	1,75	10-08-47	4,98	2,00	1,75

Tabuľka 7.9: *Tabuľka hodnôt vybraných veličín upraveného zväzku 650 nm s vplyvom teploty ventilátorového ohrievača a bez vplyvu*

Prvé meranie upraveného profilu bolo meranie bez tepelného vplyvu a s vplyvom ventilátorového ohrievača. U výkonu špičky došlo k maximálnej strate 0,37 μW , čo je 8,08 %. Merania bez vplyvu tepla preukázalo trvácnosť tvaru profilu. Výnimkou bolo meranie 10-23-27, kde je viditeľná deformácia jednej časti zväzku. Najväčší rozdiel maximálnych špičiek samotných v meraní bez vplyvu je len 0,03 μW .

Po vplyve ventilátorového ohrievača sa táto trvácnosť opakovala. Zväzok si zachoval tvar. U samotných meraní je vidieť postupné mierne zostrovanie všetkých špičiek zväzku. To je ale nevýrazné. Priemer zväzku sa viditeľne nezmenil a okom v grafoch nie je možné pozorovať nárast objemu zväzku presne tak ako u predošlého laserového modulu s týmto druhom vplyvu. Rozdiel maximálnych špičiek v samotnom meraní je najviac 0,13 μW . Čo je viac, než u merania bez vplyvu. Intenzita zväzku kolísala viac, no tvar ostal viac menej zachovaný.

Bez vplyvu				Vplyv elektrického variča			
Súbor	Maximálny výkon [μW]	Hranice zväzku [cm]	FWHM [cm]	Súbor	Maximálny výkon [μW]	Hranice zväzku [cm]	FWHM [cm]
15-19-08	18,73	2,00	1,75	14-30-40	17,69	2,00	1,75
15-27-42	18,22	2,00	1,75	14-39-14	17,47	2,00	1,75
15-36-14	18,40	2,00	1,75	14-47-46	17,51	2,00	1,75
15-44-46	18,54	2,00	1,75	14-56-18	17,64	2,00	1,75
15-53-18	18,54	2,00	1,75	15-04-50	17,60	2,00	1,75

Tabuľka 7.10: *Tabuľka hodnôt špičkového výkonu a rozmerov upraveného zväzku 650 nm s vplyvom teploty elektrického variča a bez vplyvu*

V druhej sérii meraní profil bez vplyvu vykazuje podobné vlastnosti ako v predošlej sérii. Rozdiel je v tom, že nedošlo k žiadnej deformácii nejakej časti zväzku. V tomto prípade ale narastá rozdiel intenzity špičkového výkonu v rovnakom typu merania na 0,51 μW . Vyšší maximálny výkon tohto zväzku bez vplyvu oproti prvému, ktorý bol meraný voči vplyvom ventilátorového ohrievača je spôsobený iným umiestnením laserového modulu pred kolimačnou šošovkou. Stred rozšíreného zväzku, ktorý dopadal na priezor mal teda väčšiu intenzitu, než v predošlom prípade.

Vplyvom elektrického variča sa prejavil najväčší pokles oproti zväzku bez vplyvu a to $1,27 \mu\text{W}$. Najväčšia strata je teda percentuálne $6,73 \%$ výkonu. Rozdiely medzi špičkovými výkonmi v samotnom meraní s vplyvom je $0,22 \mu\text{W}$. Priemer zväzku sa opäť nemenil, tento krát nie je možné pozorovať žiadne zmeny v náraste objemu ani v pozícií hraníc zväzku. Aj u tohto merania si upravený zväzok zachovával svoj pôvodný tvar. Deformácie nastávali minimálne v niektorých častiach špičiek zväzku. Tieto deformácie sa prejavili zostrením danej špičky, no len nepatrne.

7.6 Vyhodnotenie

Najväčší rozdiel vybraných veličín voči meraniu bez tepelného vplyvu je v tabuľkách 7.11 a 7.12. V tabuľkách 7.13 a 7.14 sú najväčšie vzájomné rozdiely hodnôt tej danej série meraní. Vybrané hodnoty slúžia na rozšírenie náhľadu na vlastností zväzku a priblíženie jeho vlastností pri pôsobení daného vplyvu.

Pre detailnejšie a presnejšie meranie týchto veličín by bolo nutné použiť iný typ merania. Cieľom je vyhodnotenie celkových vlastností daného zväzku, nie len jednotlivých vybraných veličín.

Typ modulu [nm]	Typ vplyvu	Maximálny rozdiel veličiny voči meraniam bez vplyvu				
		Maximálny výkon [μW]	Elip. zväzku X [cm]	Elip. zväzku Y [cm]	FWHM osi X [cm]	FWHM osi Y [cm]
408	Ohrievač	16,51	0,25	0,75	1,00	1,50
	Varič	16,51	-0,50	0,75	0,75	0,75
650	Ohrievač	76,27	0,25	1,00	0,25	0,25
	Varič	71,44	0,25	0,75	0,25	0,25

Tabuľka 7.11: Tabuľka maximálnych rozdielov vybraných hodnôt voči meraniu pôvodného zväzku bez vplyvu

Typ modulu [nm]	Typ vplyvu	Maximálny výkon [μW]
408	Ohrievač	0,22
	Varič	0,24
650	Ohrievač	0,13
	Varič	1,27

Tabuľka 7.12: Tabuľka maximálnych rozdielov vybraných hodnôt voči meraniu upraveného zväzku bez vplyvu

Z pohľadu zníženia intenzity sa vyhodnotenie pomocne opiera o maximálnu hodnotu celého zväzku, teda špičkový výkon zväzku. U každého vplyvu vždy došlo k zníženiu optického výkonu oproti meraniu bez tepelného vplyvu. V prípade pôvodného profilu zväzku (eliptický Gaussov) trpel najväčšou stratou výkonu červený laserový modul (650 nm). Fialový laserový modul (408 nm) mal približne rovnakú stratu výkonu. Rozdiely medzi týmito výkonmi by sa našli, no až na úrovni nW. Červený laserový modul stratil temer o päť krát viac výkonu

než modul fialový. Z percentuálneho hľadiska ale tak extrémny rozdiel straty nie je. Voči meraniu bez vplyvu je tento najväčší rozdiel výkonu u fialového modulu približne 72 % a u červeného modulu 85 %. Hoc červený modul má stratu väčšieho výkonu nie je táto strata až tak extrémna v porovnaní s fialovým modulom ako sa na prvý pohľad zdá. Skreslenie tejto straty výkonu je spôsobené rôznou premenou elektrickej energie na optickú u každého laserového modulu.

Typ modulu [nm]	Typ vplyvu	Maximálny výkon [μ W]	Elip. zväzku X [cm]	Elip. zväzku Y [cm]	FWHM osi X [cm]	FWHM osi Y [cm]
408	Bez vplyvu	1,03	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ohrievač	3,05	0,50	0,50	1,00	1,00
	Varič	1,20	0,25	0,50	0,50	0,25
650	Bez vplyvu	1,65	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ohrievač	2,53	0,50	0,75	0,00	0,00
	Varič	1,65	0,25	0,00	0,25	0,25

Tabuľka 7.13: *Tabuľka maximálnych rozdielov vlastnej série meraní pôvodného zväzku*

Typ modulu [nm]	Typ vplyvu	Maximálny výkon [μ W]
408	Bez vplyvu	0,08
	Ohrievač	0,05
	Varič	0,01
650	Bez vplyvu	0,03
	Ohrievač	0,13
	Bez vplyvu	0,51
	Varič	0,22

Tabuľka 7.14: *Tabuľka maximálnych rozdielov vlastnej série meraní upraveného zväzku*

Vzhľadom na rôzne vplyvy je u červeného modulu jasne vidieť, že väčšiu stratu výkonu spôsobil ventilátorový ohrievač a to aj napriek tomu, že dosahoval menšiu maximálnu teplotu a rozloženie teploty bolo na menšej ploche než u elektrického variča. Tento rozdiel vo výkone je ovplyvňovaný rôznou teplotou, rozložením teploty ale aj silou prúdenia teploty. Ventilátorový ohrievač ohrieval menšiu plochu o menšej teplote, no mal podporu ventilátora, ktorý pracoval na prvom výkonnostnom stupni ohrievača. Silnejšie prúdenie môže mať za následok extrémnejšie zmiešanie teplého vzduchu s okolitým chladnejším. To môže mať za dôsledok zväčšenie počtu a intenzity vzdušných vírov, ktoré pôsobia na optickú intenzitu.

Toto potvrdzujú väčšie rozdiely špičkových výkonov u ohrievača vzhľadom na samostatnú sériu merania u oboch laserových modulov zaznamenaných v tabuľke 7.13.

Z pohľadu rozširovania, rozptylu, deformácie a vychýľovania pôvodného zväzku môžeme tiež tvrdiť, že väčší vplyv na tvar a deformácie časti zväzku mal tiež práve ventilátorový ohrievač. Vplyv na zmeny tvaru mal aj elektrický varič, no u ventilátorového ohrievača boli zmeny výraznejšie. Najviac týmito deformáciami trpel zväzok fialového

laserového modelu, než u toho červeného. Dôvodom je nižší optický výkon. U tohto tvaru profilu je možné prehlásiť, že čím nižší výkon prechádza atmosférickým prostredím tým viac ho vplyvy prostredia deformujú.

Z pohľadu rozmerov zväzku bol náhľad na vyhodnotenie kladený na hranice pôvodného zväzku nazvaný ako elipticita zväzku. Teda vzdialenosť protiľahlých krajov eliptického zväzku, ktoré sa jednoznačne ešte dali považovať za výkon zväzku a nie šumu. Rozšírenie pôvodného zväzku bolo možné pozorovať u každého vplyvu nárastom objemu daného zväzku. Toto rozšírenie ale nemá tak extrémne rozmery ako sa môže zdať na prvý pohľad v hodnotách tabuľky. Zmenami výkonu pôsobením tepla ovplyvňoval nielen samotný zväzok ale aj okolitý šum. V prípadoch, kde bol optický výkon kraja zväzku dostatočne vysoký došlo k jeho rozptýleniu a preto sa hranice zväzku javia ďalej od seba. V prípade, že výkon krajov zväzku bol tak malý, že sa stratil v okolitom šume, boli hranice zväzku na prvý pohľad bližšie.

Okrem elipticity bol pozorovaný aj parameter šírky zväzku FWHM. Rovnako ako v prípade predošlého parametru bol aj tento odčítaný pomocou vektoru s krokom merania. Prudké nárasty šírky zväzku sú spôsobené nielen deformáciou tvaru ale aj rapidným poklesom výkonu. V takom prípade stred zväzku, z ktorého bol tento parameter odčítaný, je omnoho bližšie šumovým hodnotám. V meraniach, kde došlo k veľkému nárastu elipticity zväzku sa tento nárast prejavil aj na samotnej šírke laserového zväzku.

V prípade upraveného profilu zväzku bol profil zväzku upravený metódou úpravy zväzku na zväzok typu Top Hat. Reálne sa ale nepodarilo získať tvar zväzku typu Top Hat. Preto bol použitá metóda, ktorá mala upraviť zväzok čo najviac. Dôraz sa dbal hlavne na prudkosť nárastu výkonu zväzku a na plochosť stredu zväzku. Zväzky sa pohybovali v nižších výkonových úrovniach než pôvodne eliptické Gaussove zväzky, kvôli použitej metóde, ktorá využívala prieszor. Laserové moduly mali nastavené maximálne napätie, ktoré ich ešte stále nemohlo poškodiť.

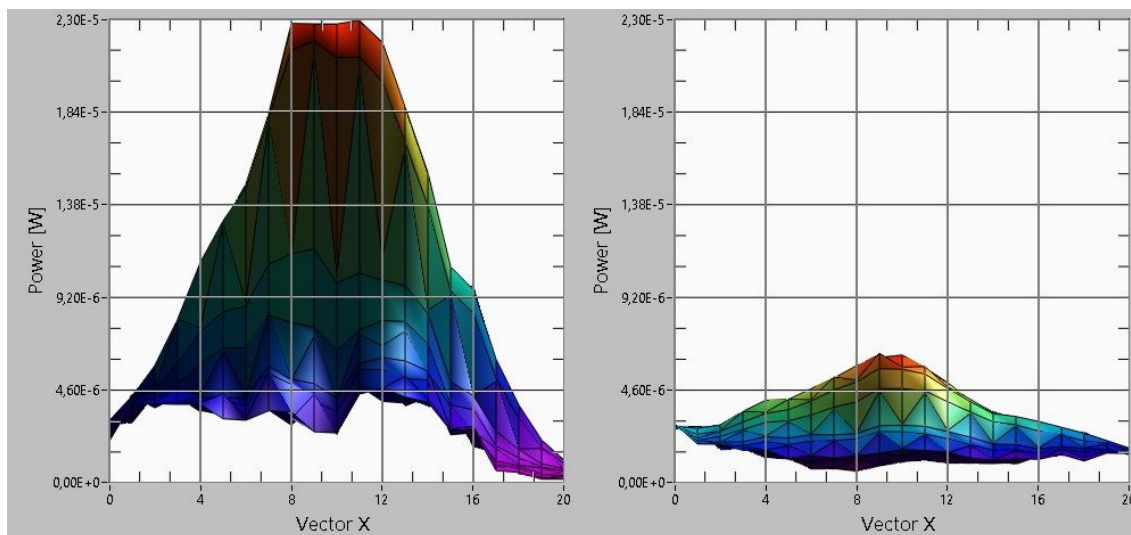
Tieto tvary zväzku zo všetkých pohľadov boli na tom lepšie než pôvodný tvar zväzku. Či už sa jednalo o zníženie intenzity vzhľadom na výkon alebo percentuálny pomer, vzdialenosť hraníc zväzku, FWHM, deformáciu zväzku a jeho častí alebo sa jednalo o objem zväzku. Väčšie rozdiely voči zväzkom bez vplyvu u tohto typu profilu spôsoboval varič. Rovnako spôsoboval väčšie rozdiely špičiek výkonov aj vzhľadom na jednotlivé série meraní. Táto vlastnosť sa výraznejšie prejavovala u červeného laserového modulu. Fialový laserový modul ako jediný výnimočný v prípade rozdielov vlastnej série merania mal menšie výkyvy optického výkonu u variča než u ohrievača.

Tvar zväzku, ktorý prináša prudký nárast intenzity lepšie odoláva negatívnym vplyvom ohrievania, než Gaussov zväzok. Nielenže trpí menšími deformáciami, jeho hranice zväzku sú lepšie rozlíšiteľné od okolitého šumu. Vzhľadom na vplyvy atmosféry spôsobené zmenou teploty je odolnejší upravovaný strmší a plochejší zväzok.

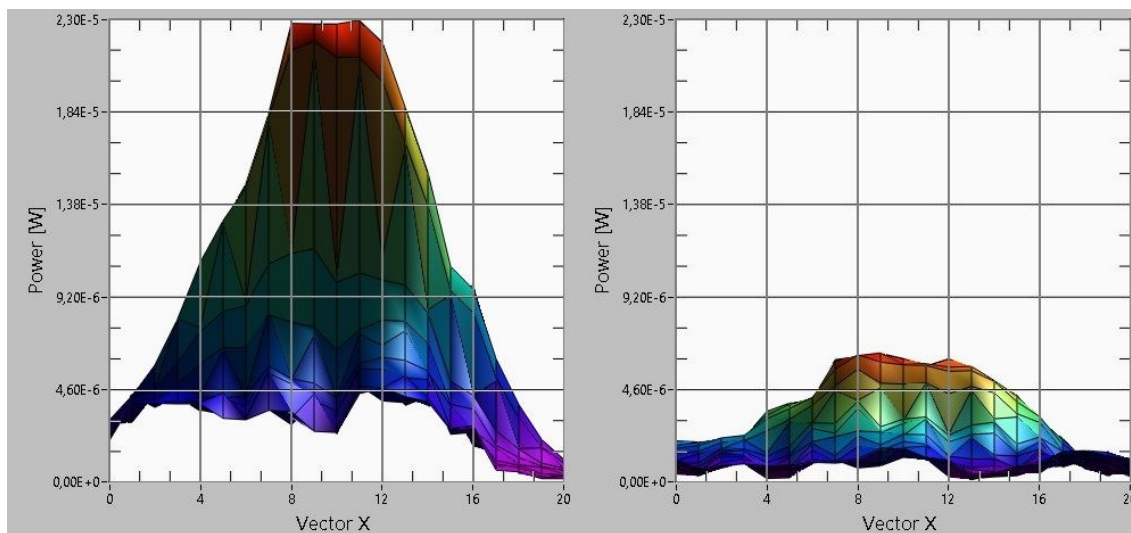
Z výsledkov meraní jasne vyplýva, že zväzok vhodný na prenos informácií prostredím by mal byť čo najstrmší s čo najplochejším vrchom zväzku. Optický výkon by teda mal byť

čo najvyšší vzhľadom na dostupný optický zdroj a ochranu ľudského zraku. Vhodná polo šírka zväzku by mala byť pri návrhu zväzku odvodená od dĺžky celého atmosférického spoja. A to tak, že čím väčšia dĺžka spoja, tým je vhodnejší širší svetelný zväzok.

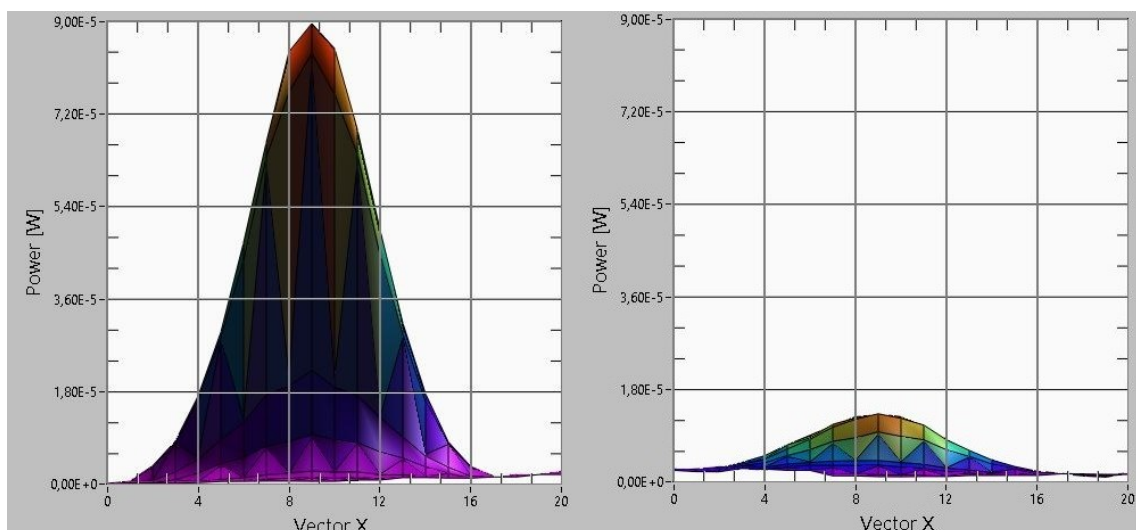
V nasledujúcich obrázkoch 7.22 až 7.29 sú vyobrazené najväčšie rozdiely optického výkonu zväzkov vychádzajúcich z tabuliek 7.11 až 7.14. Porovnanie je len z pohľadu osi X, no pomáha zlepšiť predstavu o zmenách výkonu a tvaru jednotlivých zväzkov.



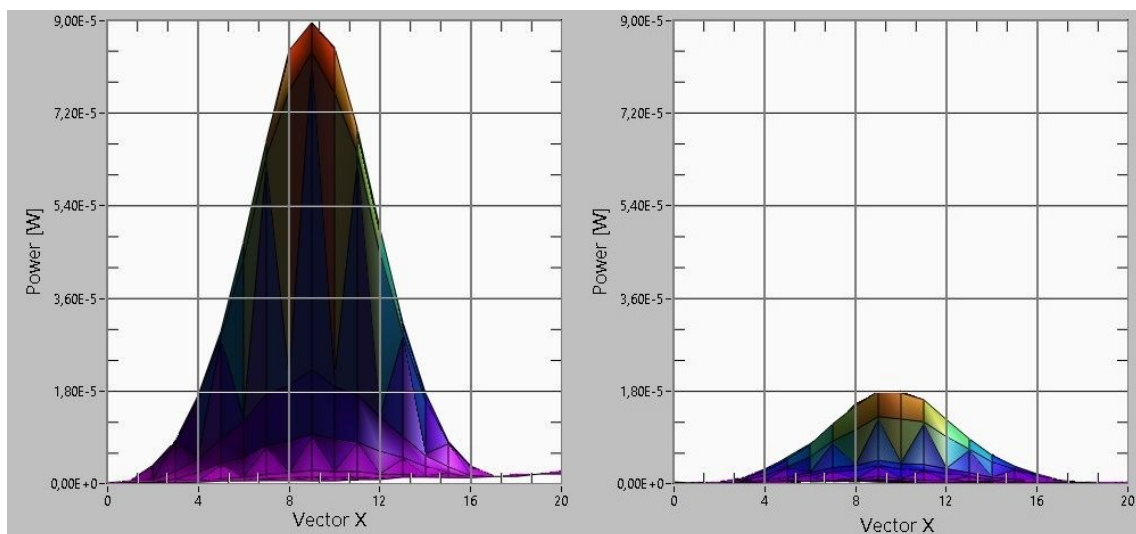
Obrázok 7.22: Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu (vľavo) voči meraniu s ventilátorovým ohrievačom (vpravo), pôvodný zväzok 408 nm



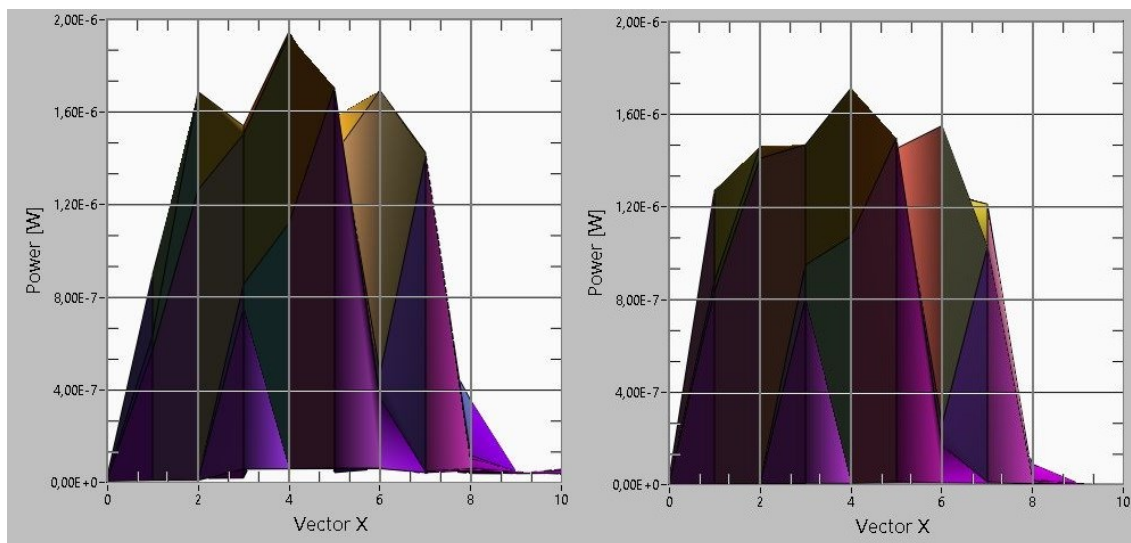
Obrázok 7.23: Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu (vľavo) voči meraniu s elektrickým varičom (vpravo), pôvodný zväzok 408 nm



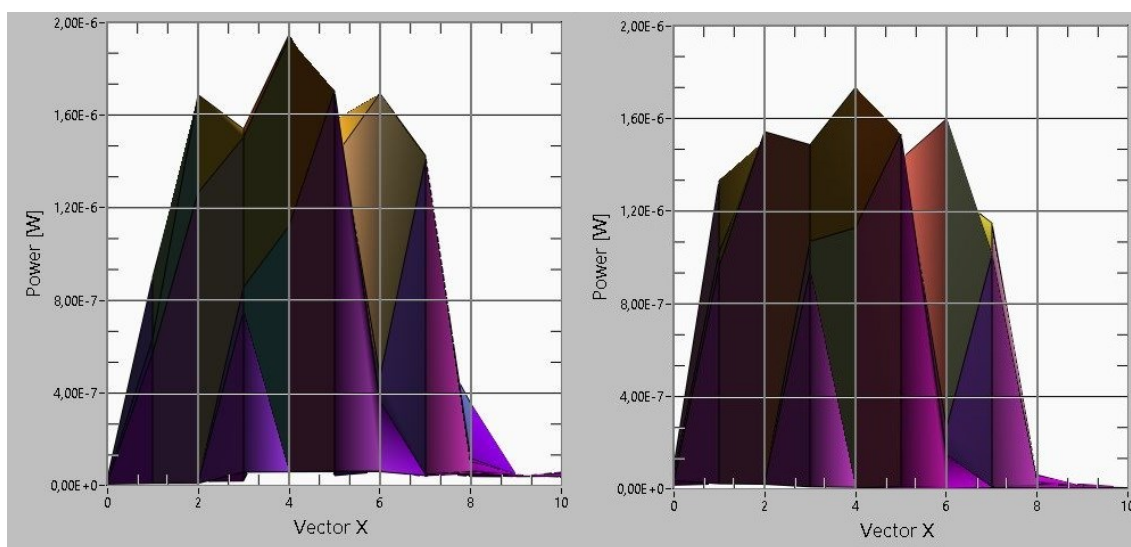
Obrázok 7.24: Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu (vľavo) voči meraniu s ventilátorovým ohrievačom (vpravo), pôvodný zväzok 650 nm



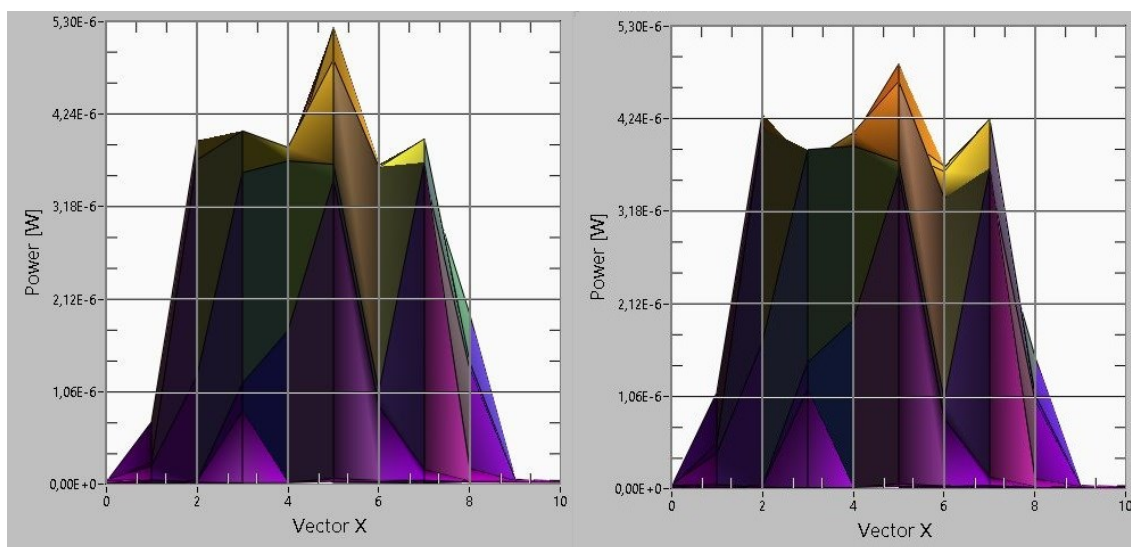
Obrázok 7.25: Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu (vľavo) voči meraniu s elektrickým varičom (vpravo), pôvodný zväzok 650 nm



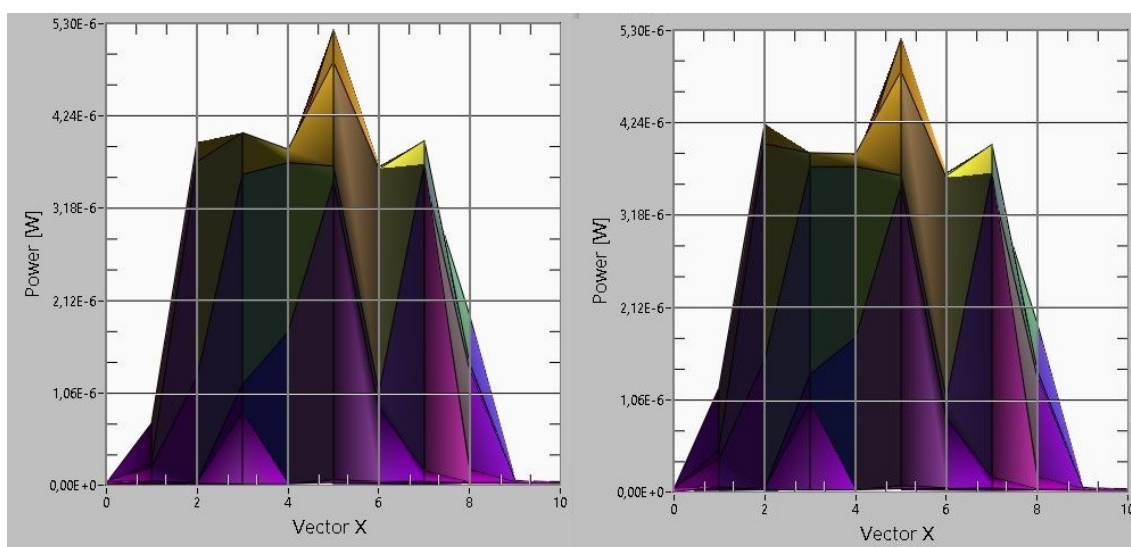
Obrázok 7.26: Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu (vľavo) voči meraniu s ventilátorovým ohrievačom (vpravo), upravený zväzok 408 nm



Obrázok 7.27: Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu (vľavo) voči meraniu s elektrickým varičom (vpravo), upravený zväzok 408 nm



Obrázok 7.28: Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu (vľavo) voči meraniu s ventilátorovým ohrievačom (vpravo), upravený zväzok 650 nm



Obrázok 7.29: Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu (vľavo) voči meraniu s elektrickým varičom (vpravo), upravený zväzok 650 nm

Záver

Cieľom práce bolo podrobne preštudovať funkciu skladbu, parametre a vlastnosti atmosférického optického spoja a jeho častí. Po zoznámení sa s základnými typmi laserových zväzkov bolo cieľom uskutočniť ich ideálne modelovanie v vhodne zvolenom programe. Zvoleným programom bol Matlab, konkrétne verzia R2014a. Skriptovacie súbory vytvorené v tomto programe sa stali základom pre trojrozmerné modelovanie ideálnych zväzkov spolu s náhľadom na ich prierezy z pohľadu osí X a Y . V prípade kruhového profilu Top Hat zväzku bol postačujúci prierez len z pohľadu osi X . Pre modelovanie Gaussovho zväzku, je potrebné aby užívateľ určil polo šírky zväzku v osi X a Y a jeho intenzitu v strede zväzku. V prípade modelu zväzku Top Hat postačí výkon zväzku s jeho priemerom.

V experimentálnej časti bolo cieľom zobrazit' rozloženie optickej intenzity reálneho zväzku v osách kolmých na osu senzoru prijímača a jeho trojrozmerný model. Ďalším z cieľov bolo pozorovať fluktuácie prijímaného optického výkonu z ktorého vychádza návrh na najvhodnejší tvar zväzku pre prenos atmosférickým prostredím. V tejto časti boli porovnávané dva laserové moduly s rôznymi vlnovými dĺžkami vysielaného optického zväzku. Tie boli pozorované za izbových podmienok, ktoré neskôr boli ovplyvňované dvomi rôznymi druhmi ohrevu (ventilátorový ohrievač, elektrický varič). Moduly a rôzne podmienky boli testované s pôvodným tvarom vysielaného zväzku a s upraveným tvarom optického zväzku. Pôvodný tvar bol eliptický Gaussov zväzok. Upravený zväzok bol strmý s kruhovou stopou vytvorený metódou, ktorá sa používa pre tvorbu Top Hat zväzku. Z dôvodu nižšej kvality častí laserových modulov nebolo možné zrealizovať zväzok, ktorý by bolo možné nazývať Top Hat. Vytvoril som preto zväzok obdobnou metódou, u ktorého bola snaha o čo najväčšiu strmosť resp. nárast výkonu a o čo najplochejší stred zväzku.

Výsledkom experimentálnej časti sa potvrdil výskyt fluktuácií optickej intenzity vo všetkých prostrediach. V prípade použitia zdroja ohrevu vo väčšine prípadov viac deformoval tvar zväzku a znižoval optický výkon práve ventilátorový ohrievač. Hoc tento zdroj ohrevu dosahoval nižšej teploty než elektrický varič bol u neho zapnutý ventilátor na prvom výkonovom stupni. Jeho pôsobením sa teplý vzduch pohyboval rýchlejšie a tak mohli dochádzať k prudšiemu premiešavanou vzduchu o rôznych teplotách a následne vzniku väčších turbulentných vírov. Domnievam sa preto, že to je hlavný dôvod prečo intenzita a deformovaný tvar vo väčšine prípadov bol u tohto typu ohrevu. V prípade elektrického variča dochádzalo tiež k výrazným zníženiam výkonu Gaussovho zväzku, no vo väčšine prípadov menšie než u vetráku. Hoc teplota zo zdroja bola väčšia ohrievaný vzduch stúpala pozvoľna bez efektu umelého prúdenia vzduchu.

V porovnaní tvarov zväzku sa vyššie popísané deformácie a zníženia intenzity viac týkali Gaussovho zväzku. V prípade upraveného zväzku dochádzalo k deformáciám a zníženiu výkonu no v omnoho menšej miere než u predošlého tvaru. Detailnému popisu výsledkov a hodnôt vybraných veličín sa venuje kapitola 7.6

Optimálny tvar a polo šírka zväzku, ktorý by mal čo najmenšie fluktuácie optického výkonu vzhľadom na vplyv zmeny teplôt, by sa mal práve viac približovať upravenému tvaru zväzku. Prudký nárast intenzity spolu s plochosťou zväzku najlepšie odolávajú negatívnym vplyvom viac než zväzky Gaussovho tvaru.

Meranie bolo doplnené meraním pomocou DTS systému, ktoré umožnilo nazrieť na rozloženie teploty, ktorej musel meraný zväzok čeliť. Je jasné, že ventilátorový ohrievač nedokáže svojou ohrevnou plochou vytvoriť teplotu ako elektrický varič. V výsledných teplotných grafoch ale môžeme pozorovať nie moc veľký rozdiel medzi špičkovými teplotami aj napriek tomu, že oba zdroje ohrevu mali rovnakú vzdialenosť od vlákna pripojenému k DTS systému. Toto skreslenie ma za následok využívanie ventilátoru v prípade ventilátorového ohrievača. Taktiež je možné si všimnúť, že u ventilátorového ohrievača nastáva v priestore prudký nárast teploty, čo môžu byť miesta v ktorých môžu vznikať teplotné víry. V prípade elektrického variča teplota stúpala omnoho pozvoľnejšie, čo môže vysvetľovať prečo mal na zväzky o niečo menší vplyv, než ventilátorový ohrievač.

Hlavný prínos tejto diplomovej práce bola experimentálna časť, ktorá overila teoretické závery a doplnila informácie o vplyvoch spôsobených zmenou teploty na tvar a intenzitu svetelného zväzku. Výsledným stanoviskom bol jednoznačný záver, ktorý dokázal identifikovať najväčšie ovplyvnenia z pohľadu odolnosti a zraniteľnosti jednotlivých typov zväzku použitých v meraní.

Medzi ostatné prínosy patrí vytvorenie ideálnych modelov študovaných zväzkov, pre zlepšenie perspektívy. Súčasťou tejto práce bola aj optimalizácia programu pre automatické meranie intenzitného profilu laserových zväzkov a zber dát. Program samotného merania spolu s programom pre vizualizáciu nameraných dát sú ďalšími neodmysliteľnými prínosmi tejto diplomovej práce. Program na meranie je utvorený tak, aby čo najviac vyhovoval potrebám užívateľa pri meraní profilu svetelného zväzku. Umožňuje mu prístup k množstvu nastavení poskytovaných hardvérom a následne niekoľkonásobne uskutočniť automaticky meranie daného profilu spolu s zaznamenaním dát.

Použitá literatura

- [1] WILFERT, Otakar. *OPTICKÁ KOMUNIKACE LASEROVÝMI SVAZKY: Současnost a perspektivy*. Brno: Ústav radioelektroniky FEKT VUT, 2007. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/seminare/Prezentace_opticke_kom_07.pdf
- [2] *Testovací měření na profesionálním atmosférickém optickém spoji*. Ostrava, 2011. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Jan Látal.
- [3] KILLINGER, Dennis K., James H. CHURNSIDE a Laurence ROTHMAN. *Atmospheric optics*. United States of America: R. R. Donnelly & Sons Company, 1995. ISBN 0-07-047740-7.
- [4] VITÁSEK, Jan. *Optické atmosférické komunikace*. Ostrava, 2014.
- [5] VOVES, J. *Elektronika polovodičů*. Praha: FEL ČVUT. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/34EPO/prednasky/>
- [6] Gaussian Beam Optics. NEWPORT. [Http://www.newport.com/](http://www.newport.com/) [online]. 2015 [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: <http://www.newport.com/Gaussian-Beam-Optics/144899/1033/content.aspx>
- [7] GALVEZ, Enrique J. COLGATE UNIVERSITY. *Gaussian Beams*. United States of America: Department of Physics and Astronomy, 2009. Dostupné z: <http://www.colgate.edu/portaldata/imagegallerywww/98c178dc-7e5b-4a04-b0a1-a73abf7f13d5/imagegallery/gaussian-beams.pdf>
- [8] Flat top / Beam shaping application notes - Diffractive optics. HOLOOR. [online]. 2015 [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: http://www.holoor.co.il/Diffractive_optics_Applications/Application_Notes_BeamShapers.htm
- [9] *Laser beam shaping: theory and techniques*. Editor Fred M Dickey, Scott C Holswade. New York: Marcel Dekker, 2000, xi, 428 s. ISBN 08-247-0398-7.

Zoznam použitých obrázkov

Označenie	Názov	Strana
1.1	Bloková schéma AOS	16
1.2	Atmosférická optická hlavica	17
1.3	Miesta útlmu v energetickej bilancii AOS	18
1.4	Znázornenie významu pomocnej dĺžky	19
2.1	Vrstvy atmosféry s vyznačením zemského povrchu a pracovnej oblasti APP	21
2.2	Graf priemernej teploty atmosféry voči nadmorskej výške	23
2.3	Fyzická charakteristika častíc atmosférických aerosólov	24
2.4	Približná veľkosť atmosférických častí	24
2.5	Priepustnosť atmosféry	25
2.6	Závislosť koeficientu útlmu a meteorologickej viditeľnosti	28
2.7	Fluktuácia intenzity Gaussovho zväzku na detektore prijímača	29
3.1	Rekombinácia Elektrón-diera	32
3.2	Stimulovaná emisia v trojhladinovom systéme	33
3.3	Závislosť optického výkonu na napájacom napätí LD a LED	35
3.4	Schéma PIN diódy a jej graf intenzity elektrického poľa voči vzdialenosti	37
3.5	MSM fotodióda	38
4.1	2D Gaussov zväzok	39
4.2	Rozloženie intenzity Gaussovho zväzku	40
4.3	Znázornenie závislosti veľkosti lúča, zakrivenia vlnoplochy a pozície z	42
4.4	Realizácia Gaussovho zväzku pomocou šošovky a väčšieho Gaussovho zväzku s negatívnym zakrivením vlnoplochy	43
4.5	Elektrické pole E , intenzita E^2 a vzor jednotlivých módov	45
4.6	Dva typy Top Hat profilu	46
4.7	Schéma optického ostriaceho systému	46
4.8	Realizácia ostriaceho systému pomocou Fázového a Transformačného prvku	47

4.9	Spôsob získania Top hat zväzku z Gaussovho zväzku pomocou upravenej Plankonvexnej šošovky (tvarovač)	47
5.1	Dvojrozmerný graf modelovaného Gaussovho zväzku z pohľadu osi X	50
5.2	Dvojrozmerný graf modelovaného Gaussovho zväzku z pohľadu osi Y	50
5.3	Trojrozmerný graf modelovaného Gaussovho zväzku	51
5.4	Dvojrozmerný graf modelovaného Top Hat zväzku	52
5.5	Trojrozmerný graf modelovaného Top Hat zväzku	52
6.1	Čelný panel programu LBIP_Measurement	53
6.2	Potrebné hodnoty nastavenia ovládača pre správnu funkciu riadiacich jednotiek motorických posuvov	56
6.3	Schéma blokového diagramu programu	59
6.4	Blokový diagram základného nastavenia	60
6.5	Blokový diagram cyklu nastavenia parametrov	61
6.6	Blokový diagram prednastavenia ovládača riadiacej jednotky pre motorický posuv	62
6.7	Blokový diagram cyklu celkových meraní	63
6.8	Blokový diagram cyklu ukladania do súboru	63
6.9	Schéma cyklu čakajúceho na povel Next Step	64
6.10	Blokový diagram riadenia motorických posuvov	65
6.11	Znázornenie pohybu senzoru pri meraní	66
6.12	Blokový diagram ukončenia programu	67
6.13	Blokový diagram cyklu nápovede	68
6.14	Blokový diagram programu pre vizualizáciu nameraných dát	68
6.15	Predný panel programu vizualizácie dát	69
7.1	Tvar zväzku po použití dvoch plano konvexných šošoviek	72
7.2	Tvar zväzku po použití priezoru	73
7.3	Základná schéma merania	74
7.4	Rozšírená schéma merania	75
7.5	Fotografia meracieho pracoviska	75
7.6	Vyznačenie polôh pre stojan s vláknom	77

7.9	Graf rozloženia intenzity teploty ventilátorového ohrievača	78
7.8	Graf rozloženia intenzity teploty elektrického variča	78
7.9	3D profil základného zväzku LD s λ 408 nm bez vplyvu (14-49-30)	79
7.10	3D profil základného zväzku LD s λ 650 nm bez vplyvu (10-36-02)	79
7.11	3D profil základného zväzku LD s λ 408 nm s vplyvom ventilátorového ohrievača (15-20-52)	79
7.12	3D profil základného zväzku LD s λ 650 nm s vplyvom ventilátorového ohrievača (12-04-56)	79
7.13	3D profil základného zväzku LD s λ 408 nm s vplyvom elektrického variča (14-13-07)	80
7.14	3D profil základného zväzku LD s λ 650 nm s vplyvom elektrického variča (11-46-28)	80
7.15	3D profil upraveného zväzku LD s λ 408 nm bez vplyvu (13-25-00)	84
7.16	3D profil upraveného zväzku LD s λ 650 nm bez vplyvu(10-31-59)	84
7.17	3D profil upraveného zväzku LD s λ 408 nm s vplyvom ventilátorového ohrievača (11-27-37)	84
7.18	3D profil upraveného zväzku LD s λ 650 nm s vplyvom ventilátorového ohrievača (09-34-39)	84
7.19	3D profil upraveného zväzku LD s λ 408 nm s vplyvom elektrického variča (12-30-32)	85
7.20	3D profil upraveného zväzku LD s λ 650 nm s vplyvom elektrického variča (14-30-40)	85
7.21	3D profil upraveného zväzku LD s λ 650 nm bez vplyvu(15-19-08) k textúre obrázku 7.20	85
7.22	Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu voči meraniu s ventilátorovým ohrievačom, pôvodný zväzok 408 nm	91
7.23	Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu voči meraniu s elektrickým varičom, pôvodný zväzok 408 nm	91
7.24	Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu voči meraniu s ventilátorovým ohrievačom, pôvodný zväzok 650 nm	92

7.25	Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu voči meraniu s elektrickým varičom, pôvodný zväzok 650 nm	92
7.26	Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu voči meraniu s ventilátorovým ohrievačom, upravený zväzok 408 nm	93
7.27	Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu voči meraniu s elektrickým varičom, upravený zväzok 408 nm	93
7.28	Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu voči meraniu s ventilátorovým ohrievačom, upravený zväzok 650 nm	94
7.29	Grafy laserových zväzkov s najväčším rozdielom výkonu v meraní bez tepelného vplyvu voči meraniu s elektrickým varičom, upravený zväzok 650 nm	94
8.1	Adresárová štruktúra CD prílohy	106

Zoznam použitých tabuliek

Označenie	Názov	Strana
2.1	Koncentrácia plynov v štandardnej atmosfére	22
2.2	Kruskeho model	27
2.3	Kimov model	27
7.1	Tabuľka hodnôt vybraných veličín bez vplyvu laserového modulu 408 nm	80
7.2	Tabuľka hodnôt vybraných veličín bez vplyvu laserového modulu 650 nm	80
7.3	Tabuľka hodnôt vybraných veličín s vplyvom ventilátorového ohrievača laserového modulu 408 nm	81
7.4	Tabuľka hodnôt vybraných veličín s vplyvom ventilátorového ohrievača laserového modulu 650 nm	81
7.5	Tabuľka hodnôt vybraných veličín s vplyvom elektrického variča laserového modulu 408 nm	82
7.6	Tabuľka hodnôt vybraných veličín s vplyvom elektrického variča laserového modulu 650 nm	82
7.7	Tabuľka hodnôt vybraných veličín upraveného zväzku 408 nm bez vplyvu	85
7.8	Tabuľka hodnôt vybraných veličín upraveného zväzku 408 nm s vplyvom teploty	86
7.9	Tabuľka hodnôt vybraných veličín upraveného zväzku 650 nm s vplyvom teploty ventilátorového ohrievača a bez vplyvu	87
7.10	Tabuľka hodnôt špičkového výkonu a rozmerov upraveného zväzku 650 nm s vplyvom teploty elektrického variča a bez vplyvu	87
7.11	Tabuľka maximálnych rozdielov vybraných hodnôt voči meraniu pôvodného zväzku bez vplyvu	88
7.12	Tabuľka maximálnych rozdielov vybraných hodnôt voči meraniu upraveného zväzku bez vplyvu	88
7.13	Tabuľka maximálnych rozdielov vlastnej série meraní pôvodného zväzku	89
7.14	Tabuľka maximálnych rozdielov vlastnej série meraní upraveného zväzku	89

Zoznam použitých vzťahov

Označenie	Názov	Strana
1.1	Účinnosť väzby	18
1.2	Útlm šírenia	19
1.3	Pomocná dĺžka	19
1.4	Zosilnenie prijímacej optickej sústavy	19
1.5	Prijatý optický výkon	20
1.6	Oblasť dynamiky prijímacieho systému	20
2.1	Lineárny prenos	26
2.2	Koeficient extinkcie	26
2.3	Extinkčný koeficient vyjadrený pomocou meteorologickej viditeľnosti	26
2.4	Koeficient útlmu	27
2.5	Fluktuácia optickej intenzity vyjadrená relatívnou variáciou optickej intenzity	29
2.6	Fluktuácie indexu lomu popísaná štruktúrnou funkciou	29
2.7	Fluktuácie indexu lomu medzi dvomi bodmi	29
2.8	Hufnagelov model	30
2.9	Vertikálny priemer druhej mocniny rýchlosti vetra	30
2.10	Hufnagel-Valleyho model	30
3.1	Vlnová dĺžka	31
3.2	Energia zakázaného pásu	31
3.3	Podmienka módov vo vnútri rezonátoru	33
4.1	Variácia elektrického poľa Gaussovho zväzku	39
4.2	Intenzita Gaussovho zväzku v jeho strede	40
4.3	Intenzita Gaussovho zväzku	40
4.4	Výkon Gaussovho zväzku obsiahnutý pod polomerom r	41
4.5	Celkový výkon prenášaný Gaussovým zväzkom	41
4.6	Polomer lúča Gaussovho zväzku	42

4.7	Zakrivenie vlnoplochy Gaussovho zväzku	42
4.8	Rayleighov rozsah Gaussovho zväzku	42
4.9	Elektromagnetické pole Gaussovho lúča	43
4.10	Uhol rozšírenia Gaussovho zväzku	43
4.11	Priemer Gaussovho zväzku	43
4.12	Výpočet elektrického poľa zväzku v karteziánskej súradnicovej sústave	44
5.1	Rozloženie optickej intenzity Gaussovho zväzku	49
5.2	Intenzita Top Hat zväzku	51
5.3	Distribúcia Top Hat zväzku	51

Zoznam príloh

Príloha A:	Obsah skriptovacieho súboru Gauss.m	I
Príloha B:	Obsah skriptovacieho súboru Top.m.....	II
Príloha C:	Fotografie z meracieho pracoviska.....	IV
Príloha D:	Ostatné 3D grafy zo jednotlivých sérií meraní.....	VI
Príloha E:	2D grafy nameraných laserových zväzkov z pohľadu osi X a Y	XV
Príloha F:	Ostatné grafy z merania rozloženia teploty DTS systémom.....	XXXII
Príloha G:	Tabuľky s parazitnými hodnotami meraní.....	XXXIV

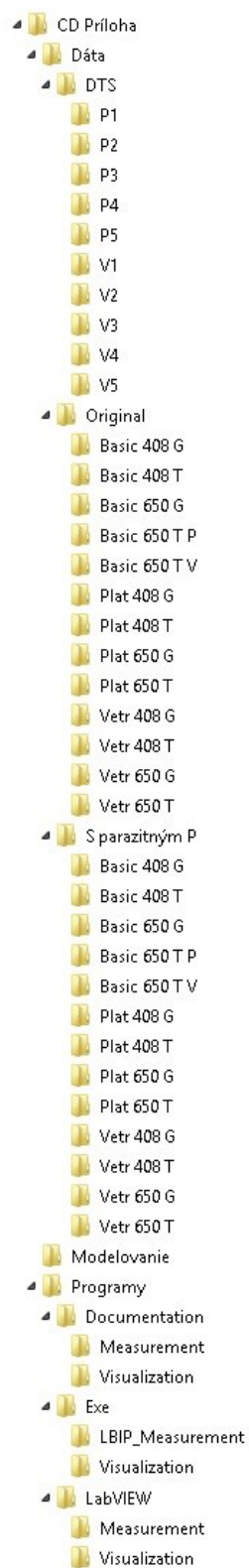
Súčasťou diplomovej práce je aj CD:

Adresárová štruktúra priloženého CD:

Obrázok 8.1 na nasledujúcej strane zobrazuje adresárovú štruktúru priloženého CD. Tá sa skladá z troch hlavných priečinkov (Dáta, Modelovanie, Programy). V priečinku Dáta sa nachádzajú tri priečinky. Priečink DTS v sebe obsahuje všetky namerané hodnoty systémom DTS vo formáte .ddf. V tomto priečinku sa nachádza súbor DTS.m, čo je skriptovací súbor programu Matlab pre vizualizáciu nameraných dát. Okrem tohto obsahuje tento priečink priečinky V1-5 a P1-5. V nich sú umiestnené namerané hodnoty DTS systémom. Priečinky s označením V sú merania ventilátorového ohrievača, priečinky s označením P sú merania elektrického variča (podľa ľudového pomenovania Platňa). Obsahom každej zložky merania sú .ddf súbory s názvami A, B, C, D, stred a pozadi. Priečink Original obsahuje 13 priečinkov jednotlivých meraní, ktoré nesú vlastné označenie. Prvé slovo priečinka označuje či ide o meranie bez vplyvu (Basic), s vplyvom ventilátorového ohrievača (Vetr) alebo s vplyvom, elektrického variča (Plat). Druhé je číslo vlnovej dĺžky svetelného zväzku daného modulu (408, 650). Tretie je označenie, či ide o pôvodný neupravený profil (G) alebo o upravený profil (T). V prípade základných meraní upraveného profilu modulu s vlnovou dĺžkou 650 nm jestvujú dve merania pre porovnanie bez vplyvu a to voči elektrickému variču (P) alebo ventilátorovému ohrievaču (V). Každý z týchto priečinkov obsahuje textové súbory s nameranými hodnotami a obrázky grafov týchto meraní. Priečink s názvom „S parazitným P“ nesie temer rovnaký obsah (bez grafov), ako predošlé priečinky, no textové súbory s nameranými dátami nemajú od seba odčítané parazitné hodnoty výkonov.

Priečink s názvom Modelovanie obsahuje dva skriptovacie súbory programu Matlab (Gauss.m, Top.m). Tie boli použité v časti pre modelovanie.

Priečink Programy obsahuje všetko týkajúce sa optimalizácie programov. V priečinku Documentation je .html dokumentácia s obrázkami jednotlivých programov rozdelená do priečinkov Visualizaion a Measurement. V priečinku Exe sú spustiteľné súbory programov pre merania vizualizáciu s rovnakým rozdelením priečinkov. V priečinku LabVIEW sú tieto programy v podobe súborov vývojového prostredia LabVIEW.



Obrázok 8.1: *Adresárová štruktúra CD prílohy*

Príloha A: *Obsah skriptovacieho súboru Gauss.m*

```
clc; clear all; close all;

I0=1; % intenzita v strede zväzku
wx=20; % pološířka svazku v ose x vmm
wy=40; % pološířka svazku v ose y v mm
x=(-100:1:100);
y=(-100:1:100);
[X, Y] = meshgrid(-100:3:100,-100:3:100);

Ix = I0.*exp(-2*(x).^2/(wx^2)); % výpočet 2D grafu osi x
Iy = I0.*exp(-2*(y).^2/(wy^2)); % výpočet 2D grafu osi y
II = I0.*exp(-2*(X).^2/(wx^2)-2*(Y).^2/(wy^2)); % výpočet 3D
grafu
figure(1)
plot(x,Ix);
grid on;
xlabel('Vzdialenosť od stredu [mm]')
ylabel('Optická intenzita [W \cdot m^{-2}]')
title('2D graf Gaussovho zväzku osi X')
figure(2)
plot(y,Iy);
grid on;
xlabel('Vzdialenosť od stredu [mm]')
ylabel('Optická intenzita [W \cdot m^{-2}]')
title('2D graf Gaussovho zväzku osi Y')
figure(3)
surf(X,Y,II);
xlabel('Vzdialenosť od stredu [mm]')
ylabel('Vzdialenosť od stredu [mm]')
zlabel('Optická intenzita [W \cdot m^{-2}]')
title('3D graf Gaussovho zväzku')
```

Príloha B: *Obsah skriptovacieho súboru Top.m*

```
clc; clear all; close all;

W=1.2;
N=100;
d=30;    % Priemer v mm
P=10000;    % Výkon vo Wattoch
x=(-100:1:100);
Ta=x;
X=linspace(-W*abs(d),W*abs(d),N);
Y=X;
Tb=zeros(length(X),length(Y));

I=P/(pi*((d^2)/4)); % Výpočet intenzity

for k=1:length(Ta)
    r=x(k);
    if and(r<=d/2,r>=-(d/2))
        Ta(k)=I;
    else
        Ta(k)=0;
    end;
end;

for i=1:length(X)
    for j=1:length(Y)
        R=sqrt(X(i)^2+Y(j)^2);
        if R<=d/2
            Tb(j,i)=I;
        end;
    end;
end;

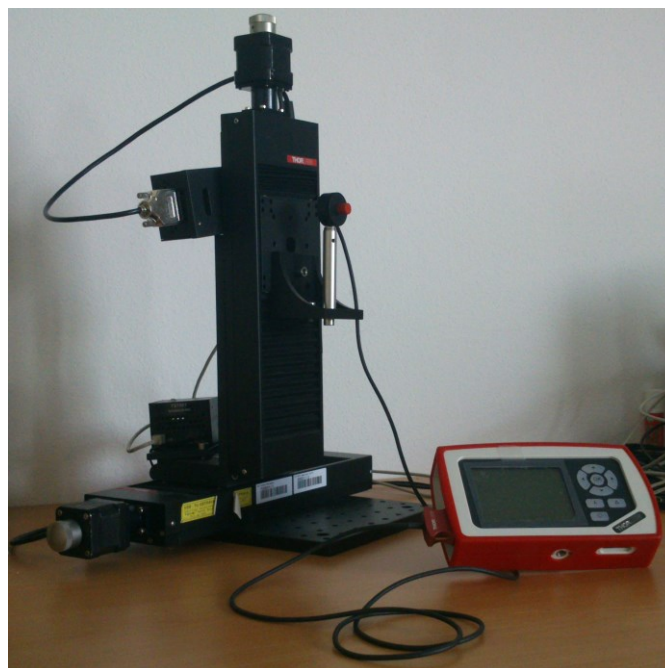
end;
```

```
figure(1)
plot(x,Ta);
grid on;
xlabel('Vzdialenosť od stredu [mm]')
ylabel('Optická intenzita [W \cdot m^{-2}]')
zlabel('Optická intenzita [W \cdot m^{-2}]')
title('2D graf Top Hat zväzku')
```

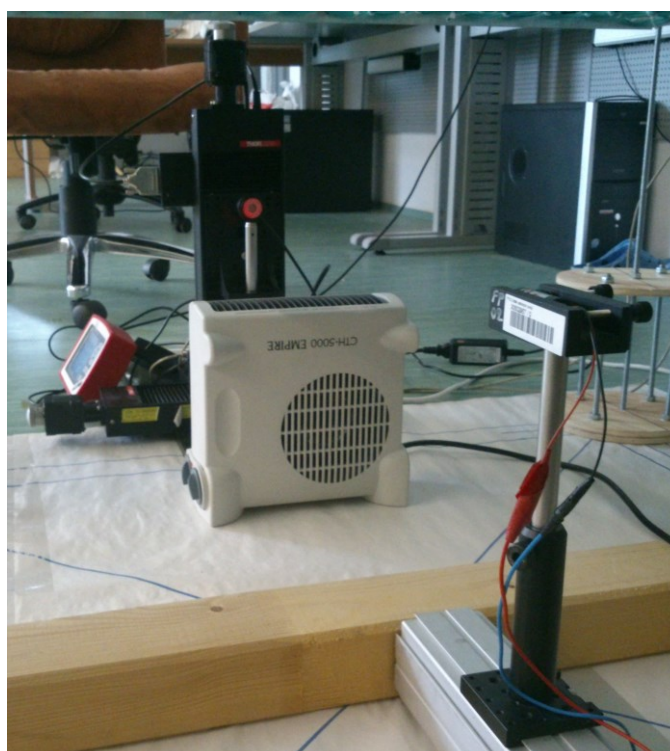
```
figure(2)
surf(X,Y,Tb);
xlabel('Vzdialenosť od stredu [mm]')
ylabel('Vzdialenosť od stredu [mm]')
zlabel('Optická intenzita [W \cdot m^{-2}]')
title('3D graf Top Hat zväzku')
```

Príloha C: *Fotografie z meracieho pracoviska*

Obrázok C.1: *Hardvér ovládaný programom LBIP_Measurement*



Obrázok C.2: *Meranie základného zväzku ovplyvneného ventilátorovým ohrievačom*



Obrázok C.3: *Meranie upraveného zväzku ovplyvneného elektrickým varičom*

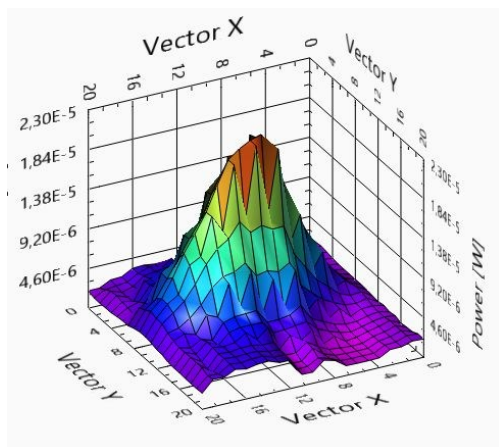


Obrázok C.4: *Pohľad na meracie pracovisko z hora (upevnenie vlákna pre DTS systém)*

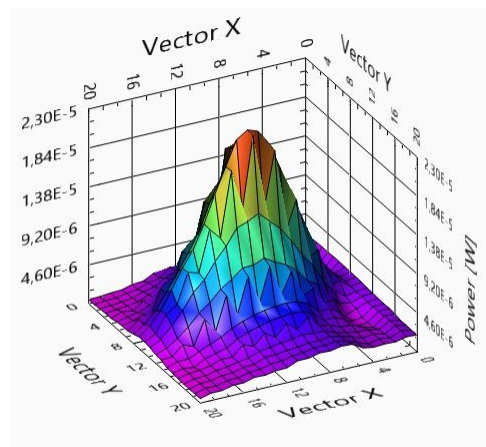


Príloha D: *Ostatné 3D grafy z jednotlivých sérií meraní*

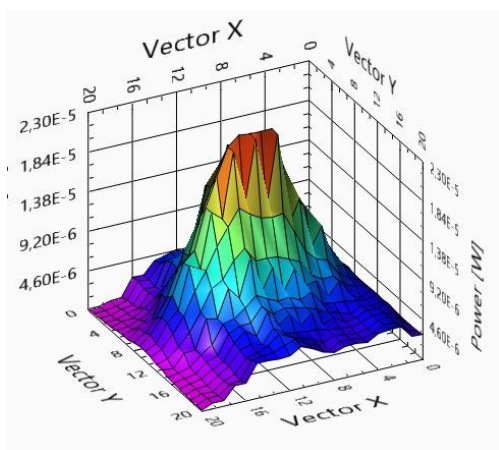
Obrázok D.1: 13-48-45



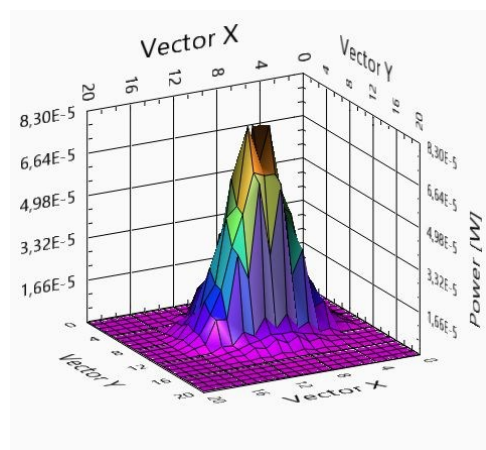
Obrázok D.4: 15-50-18



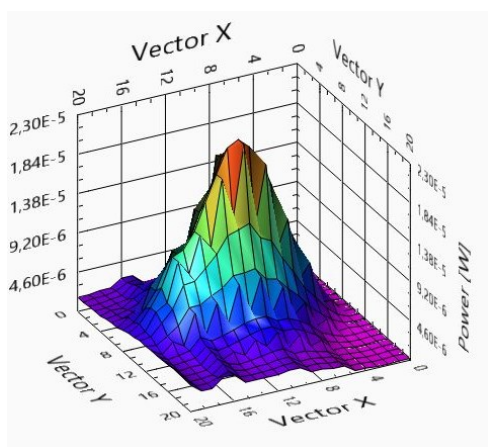
Obrázok D.2: 14-19-06



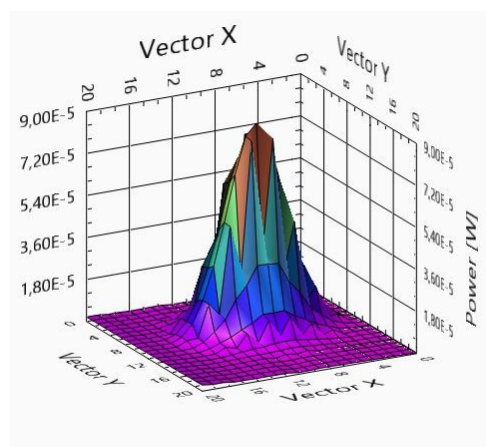
Obrázok D.5: 10-05-39



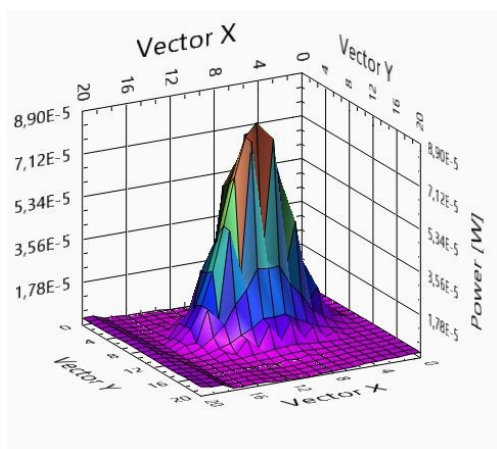
Obrázok D.3: 15-19-54



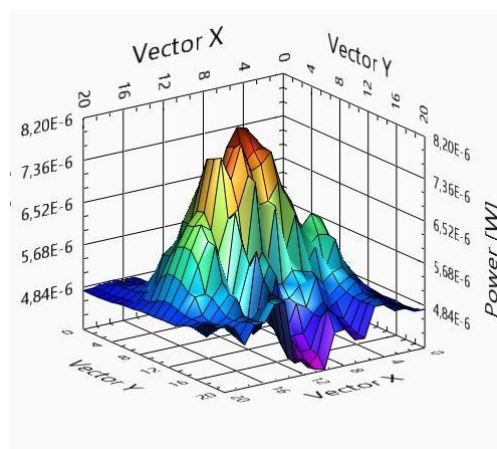
Obrázok D.6: 11-06-26



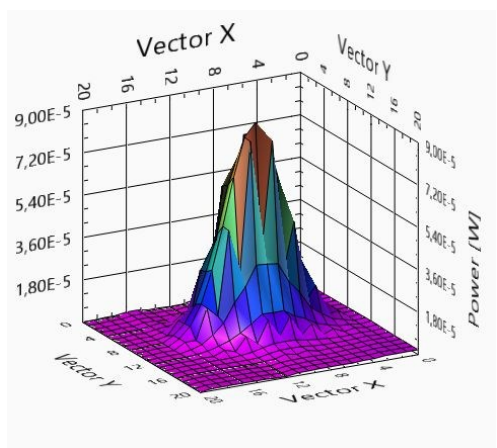
Obrázok D.7: 11-36-50



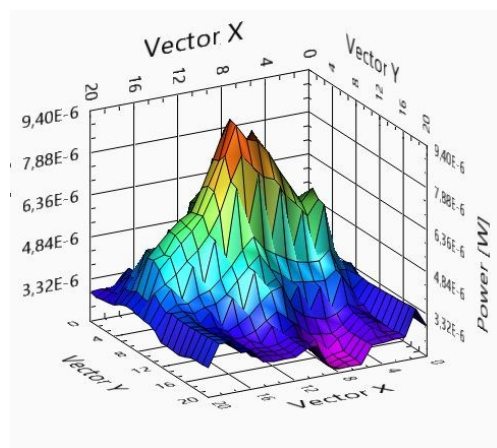
Obrázok D.10: 10-26-24



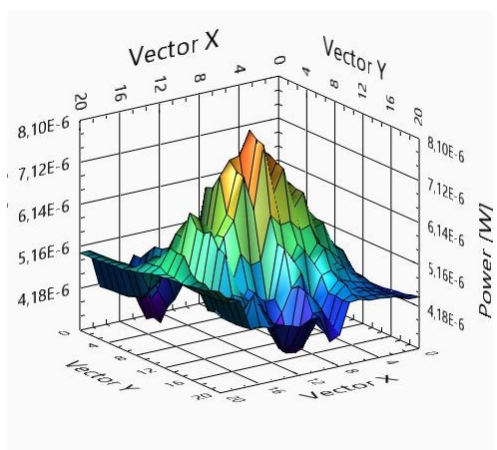
Obrázok D.8: 12-07-14



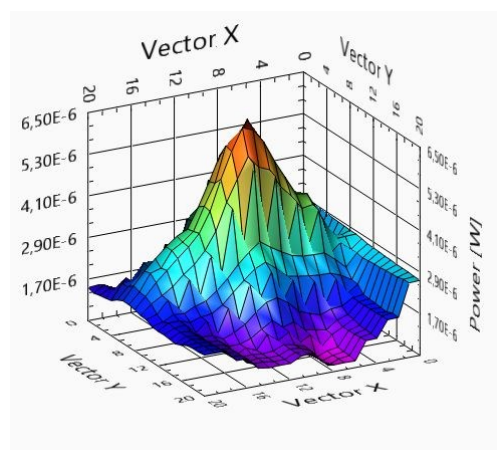
Obrázok D.11: 13-48-41



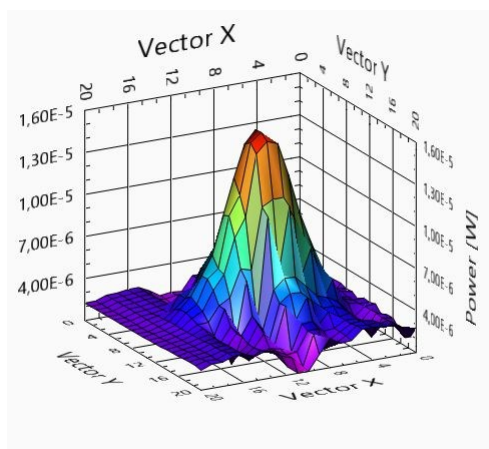
Obrázok D.9: 09-56-02



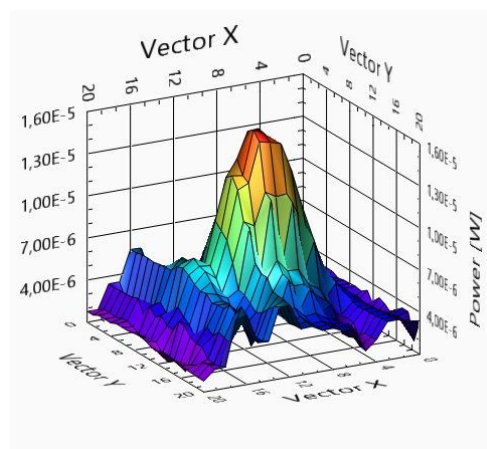
Obrázok D.12: 15-51-36



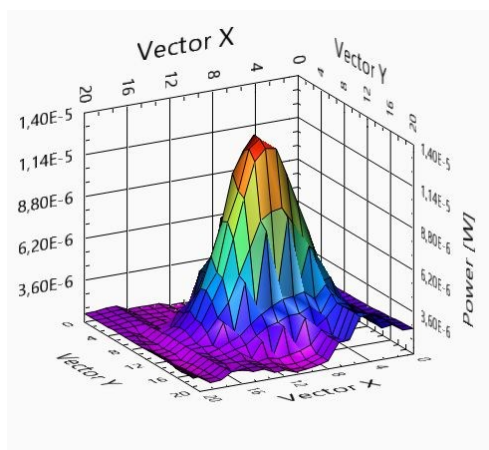
Obrázok D.13: 11-03-28



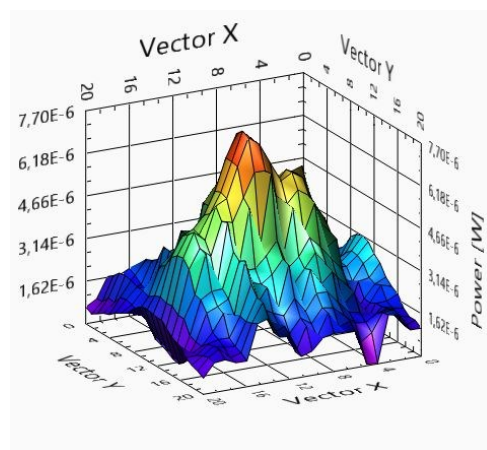
Obrázok D.16: 13-06-24



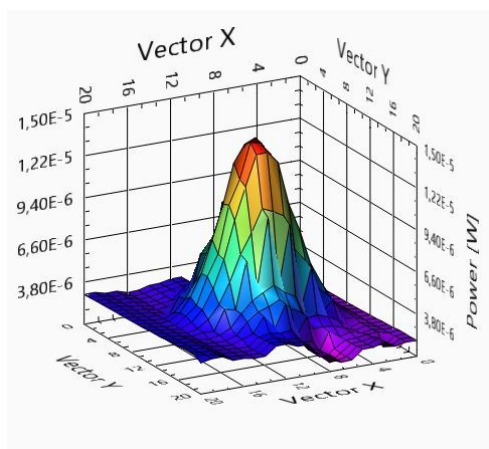
Obrázok D.14: 11-34-12



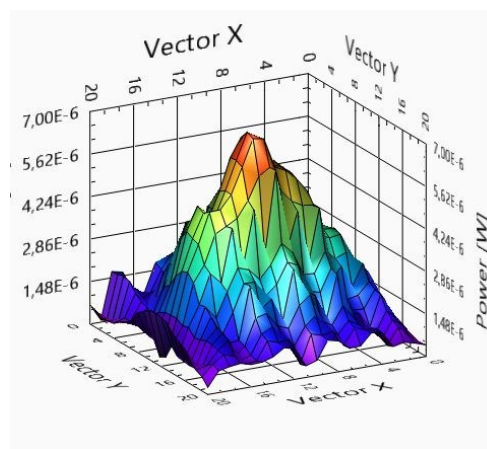
Obrázok D.17: 12-04-04



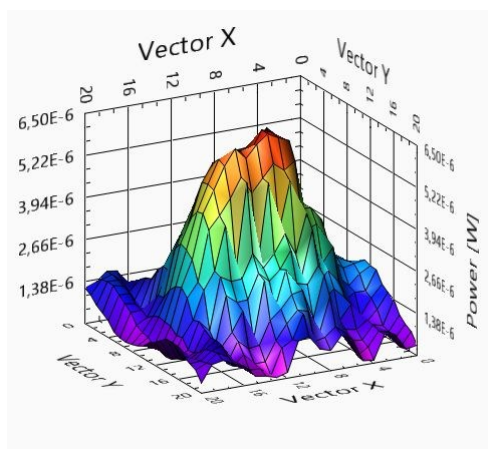
Obrázok D.15: 12-35-40



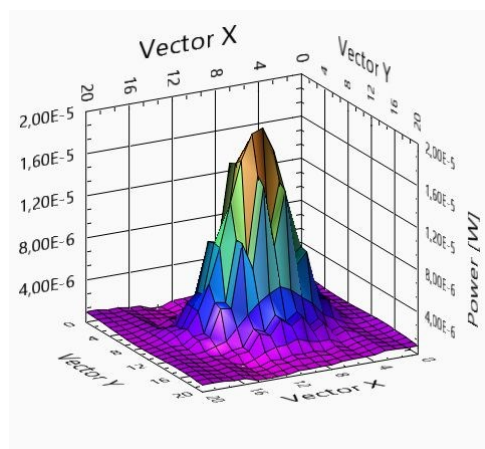
Obrázok D.18: 12-34-28



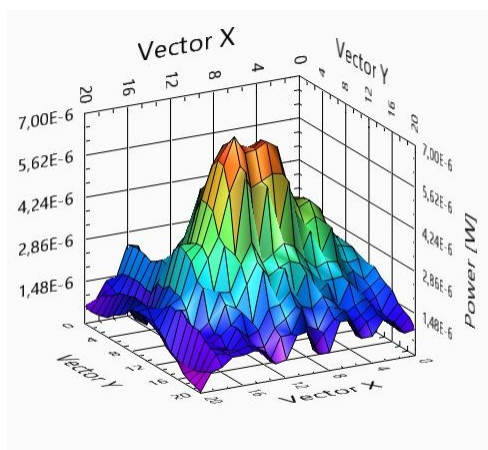
Obrázok D.19: 13-04-52



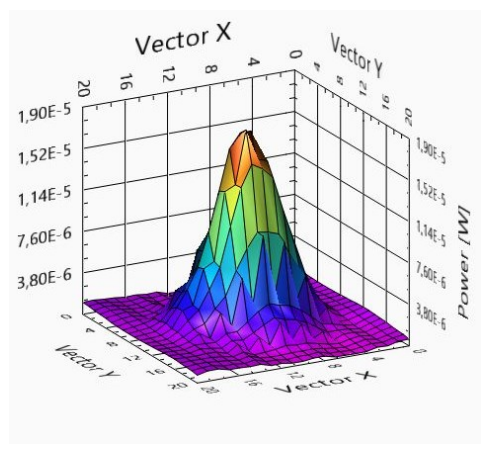
Obrázok D.22: 11-16-06



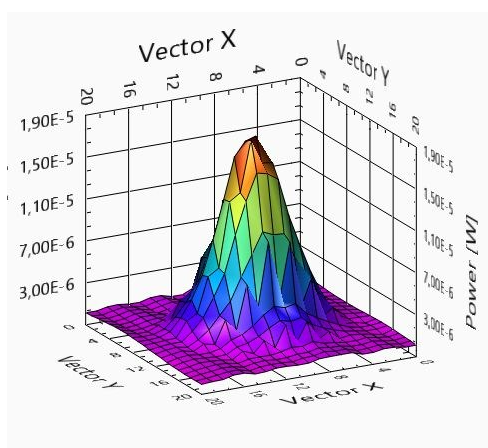
Obrázok D.20: 13-35-16



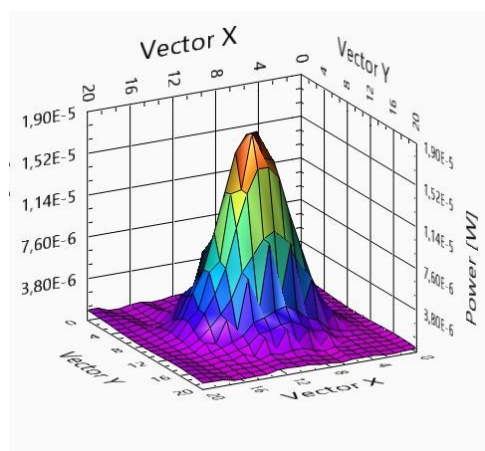
Obrázok D.23: 12-16-52



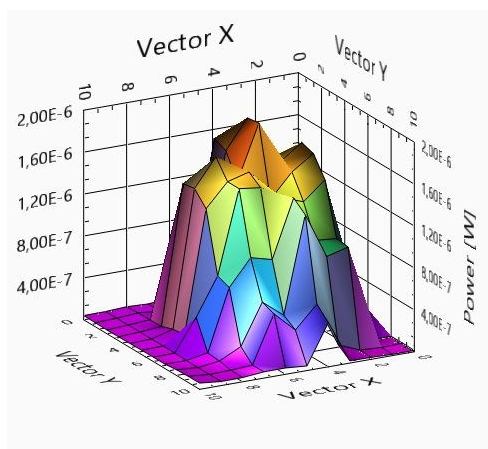
Obrázok D.21: 10-37-04



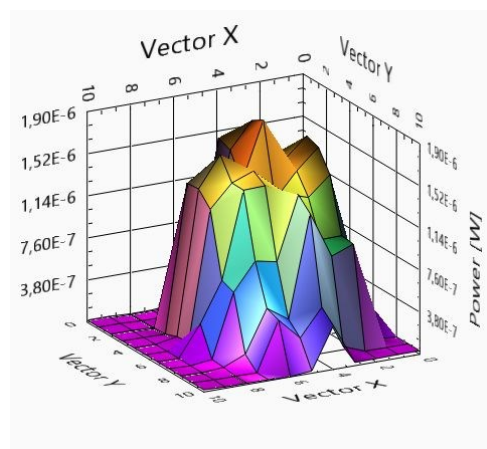
Obrázok D.24: 12-47-16



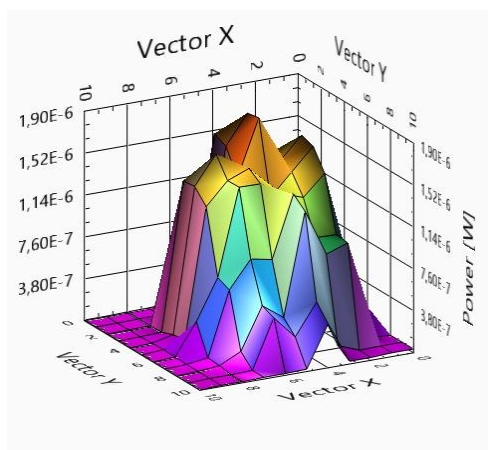
Obrázok D.25: 11-36-10



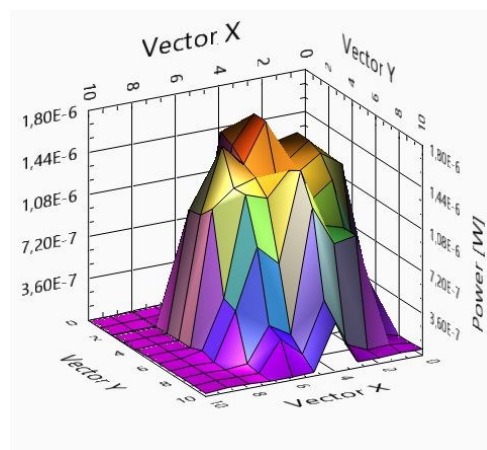
Obrázok D.28: 12-01-46



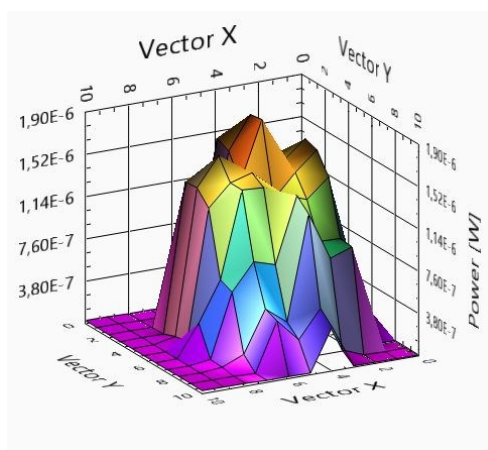
Obrázok D.26: 11-44-42



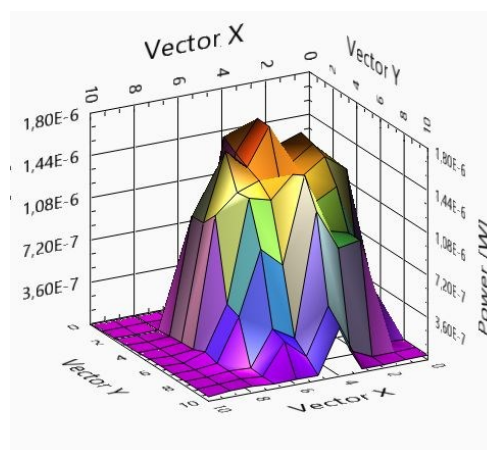
Obrázok D.29: 12-39-06



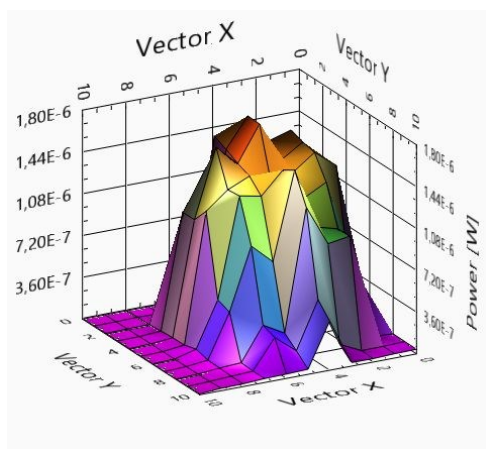
Obrázok D.27: 11-53-14



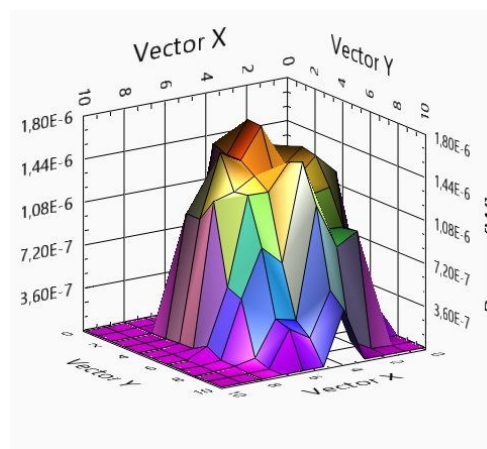
Obrázok D.30: 12-47-38



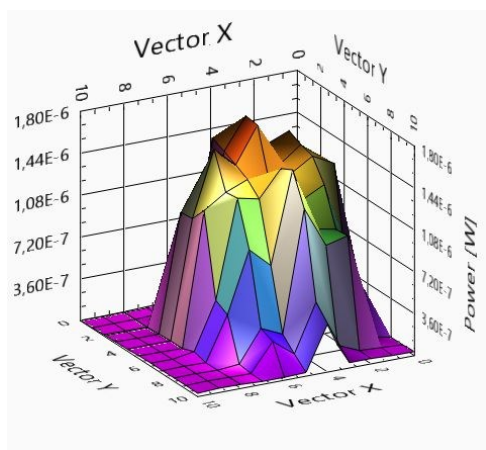
Obrázok D.31: 12-56-10



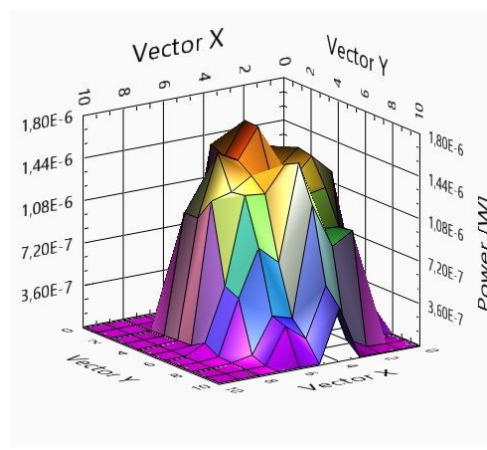
Obrázok D.34: 13-42-38



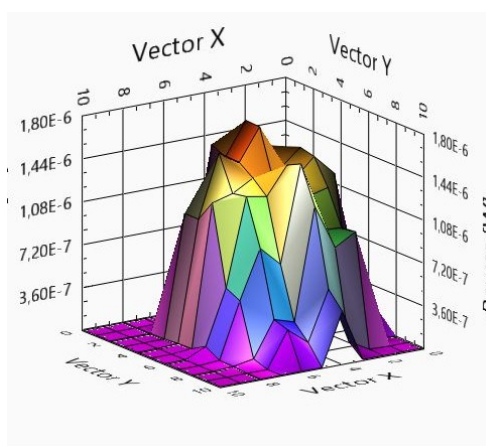
Obrázok D.32: 13-04-42



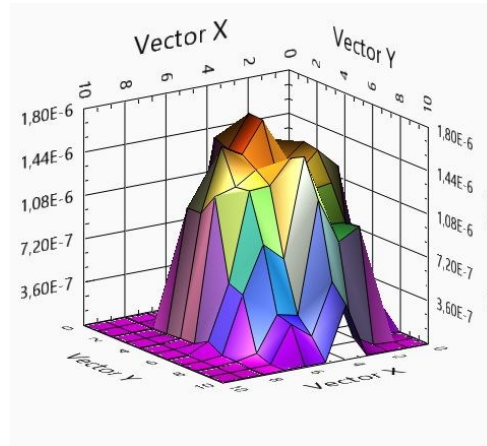
Obrázok D.35: 13-51-10



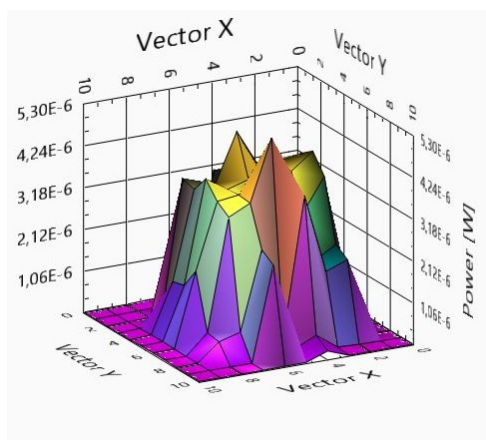
Obrázok D.33: 13-34-06



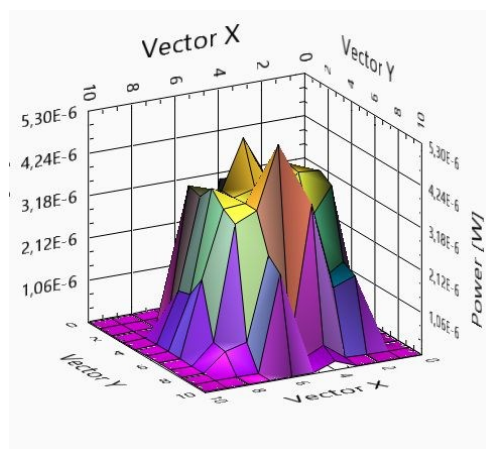
Obrázok D.36: 13-59-42



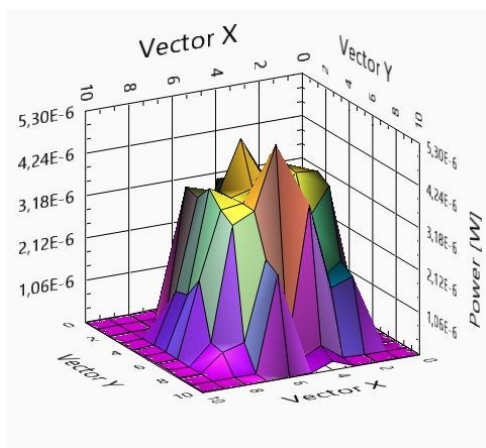
Obrázok D.37: 10-23-27



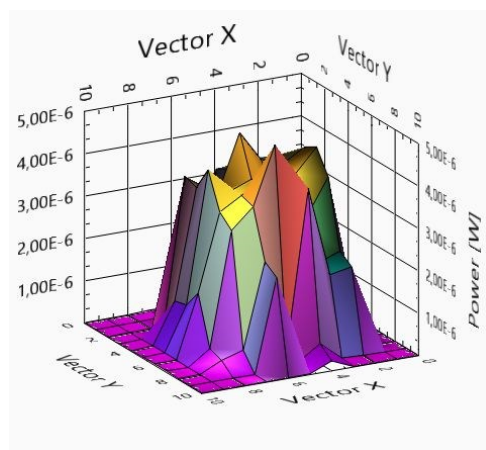
Obrázok D.40: 10-57-35



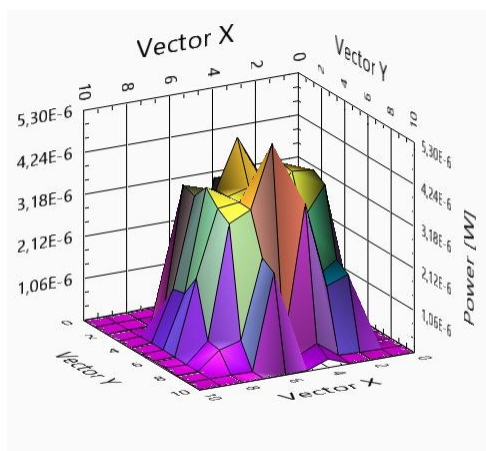
Obrázok D.38: 10-40-31



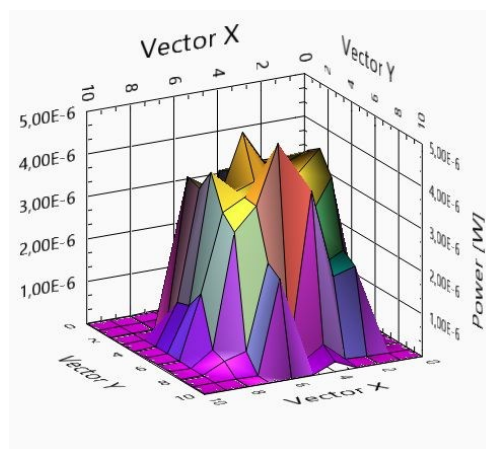
Obrázok D.41: 09-43-11



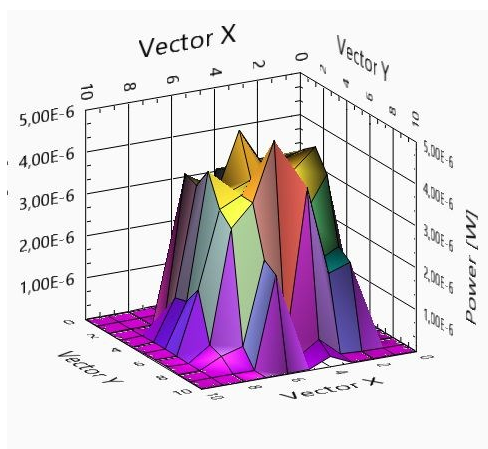
Obrázok D.39: 10-49-03



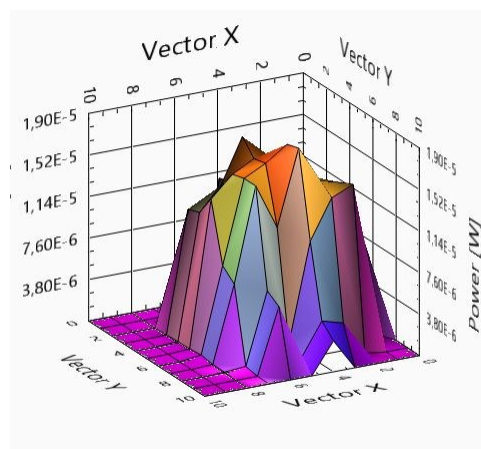
Obrázok D.42: 09-51-43



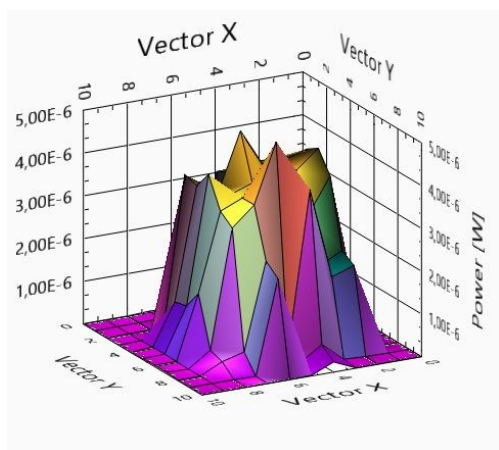
Obrázok D.43: 10-00-15



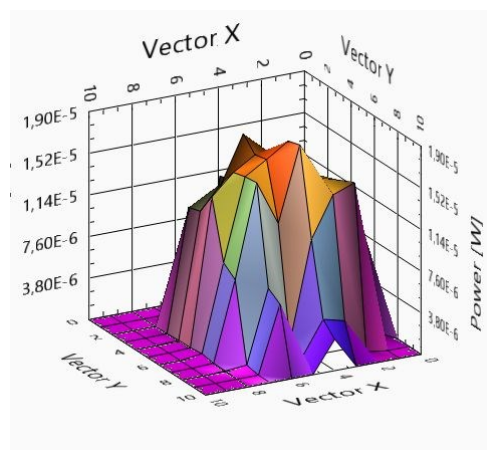
Obrázok D.46: 15-36-14



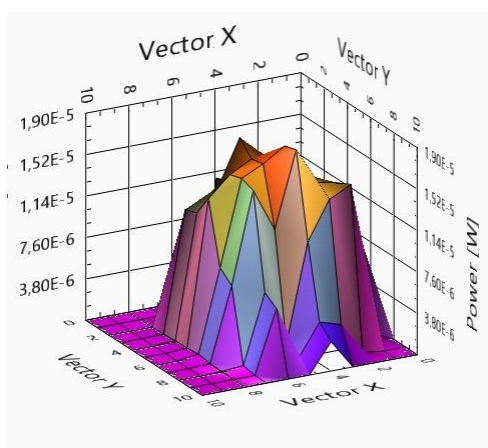
Obrázok D.44: 10-08-47



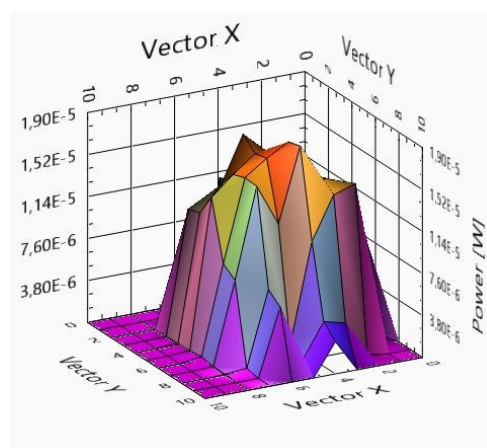
Obrázok D.47: 15-44-46



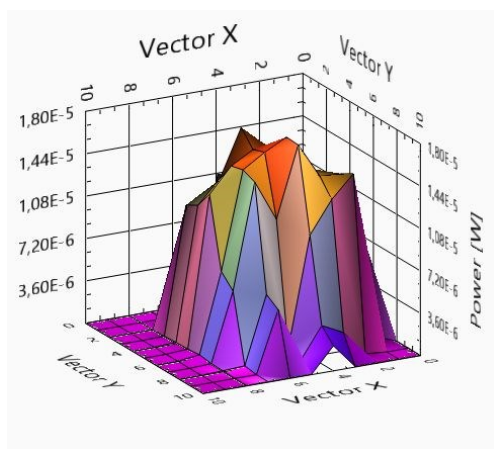
Obrázok D.45: 15-27-42



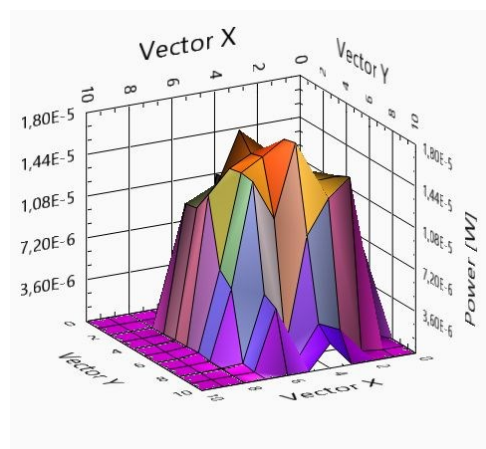
Obrázok D.48: 15-53-18



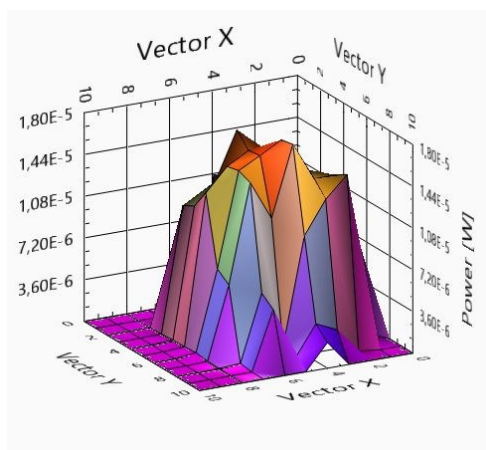
Obrázok D.49: 14-39-14



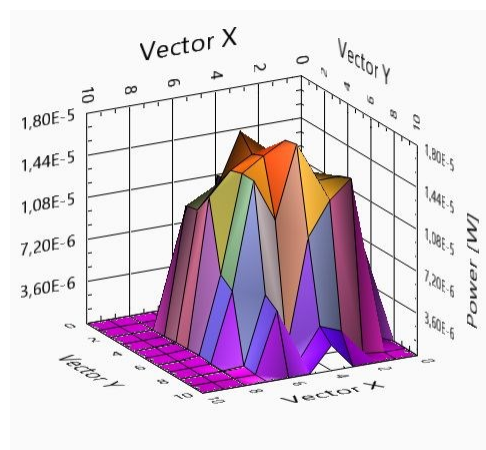
Obrázok D.51: 14-56-18



Obrázok D.50: 14-47-46

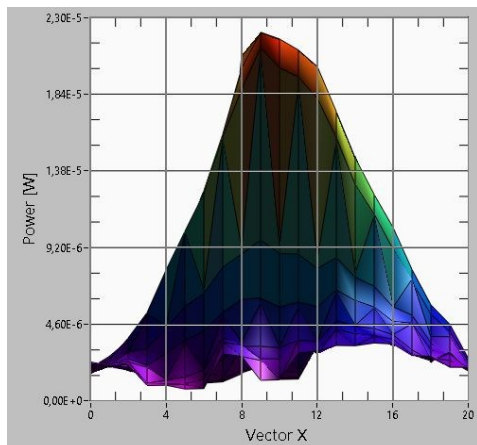


Obrázok D.52: 15-04-50

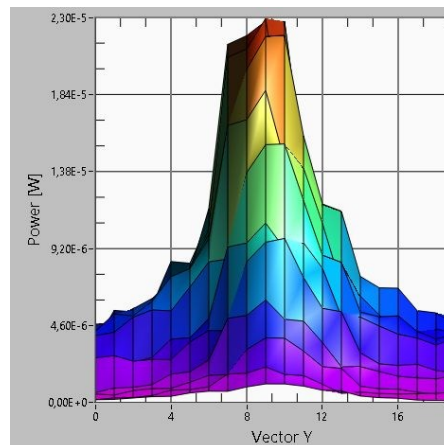


Príloha E: 2D grafy nameraných laserových zväzkov z pohľadu osi X a Y

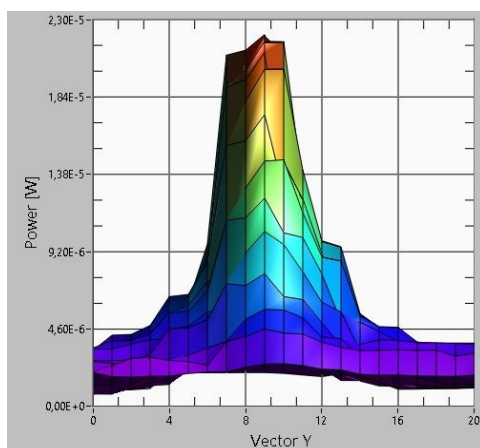
Obrázok E.1: 13-48-45 z pohľadu osi X



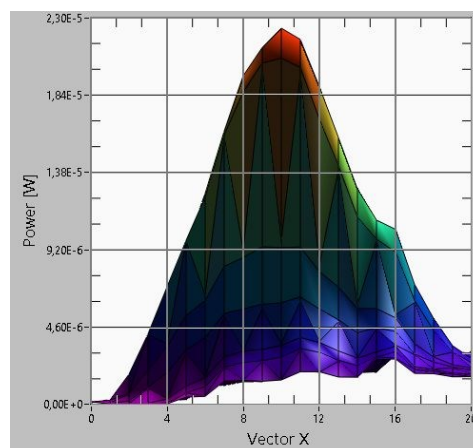
Obrázok E.4: 14-19-06 z pohľadu osi Y



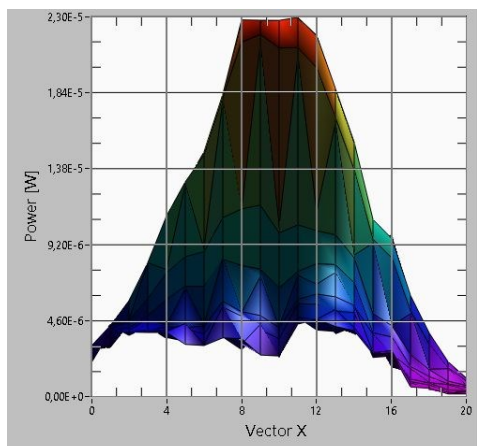
Obrázok E.2: 13-48-45 z pohľadu osi Y



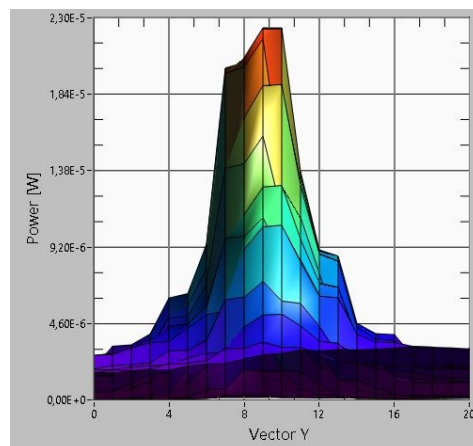
Obrázok E.5: 15-19-54 z pohľadu osi X



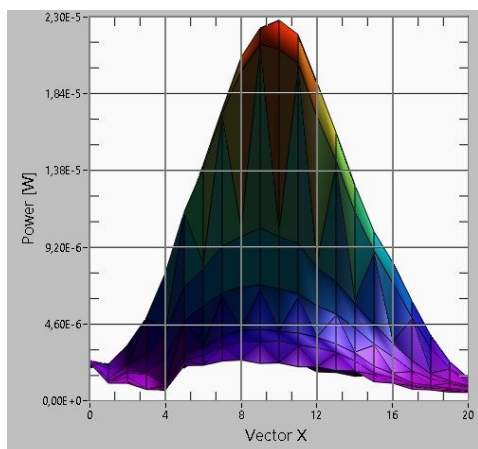
Obrázok E.3: 14-19-06 z pohľadu osi X



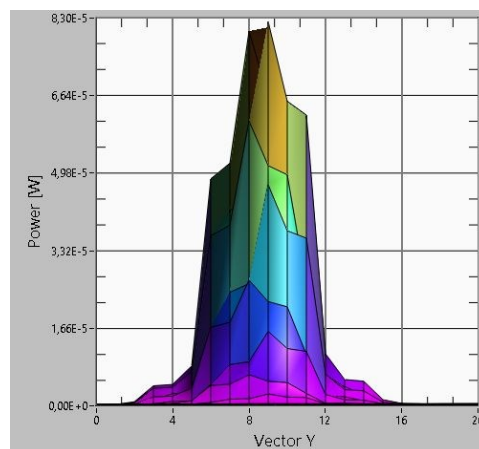
Obrázok E.6: 15-19-54 z pohľadu osi Y



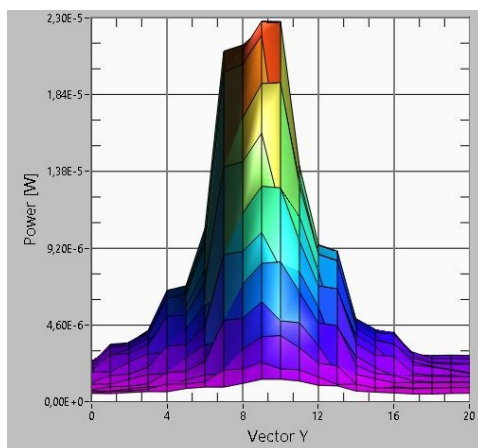
Obrázok E.7: 15-50-18 z pohľadu osi X



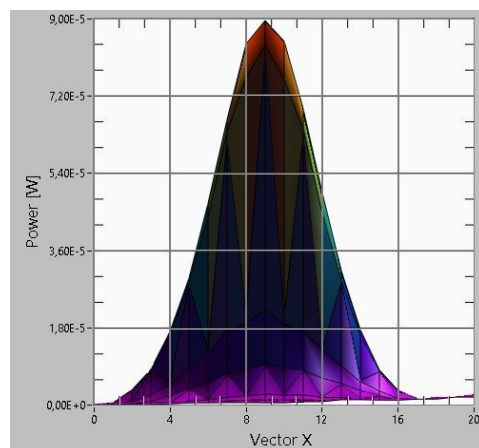
Obrázok E.10: 10-05-39 z pohľadu osi Y



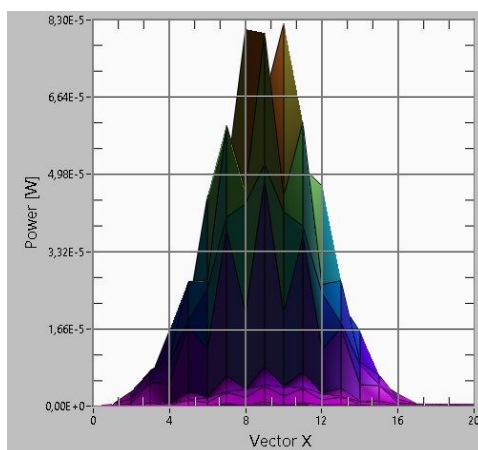
Obrázok E.8: 15-50-18 z pohľadu osi Y



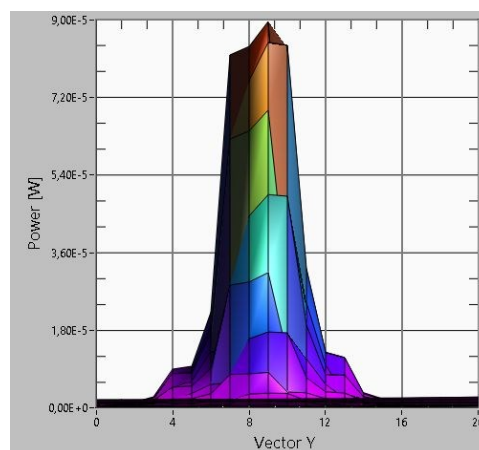
Obrázok E.11: 11-06-26 z pohľadu osi X



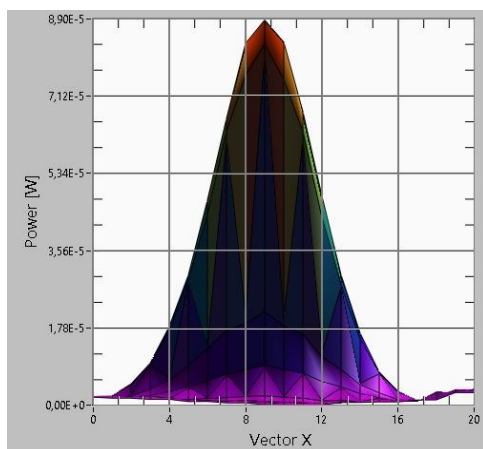
Obrázok E.9: 10-05-39 z pohľadu osi X



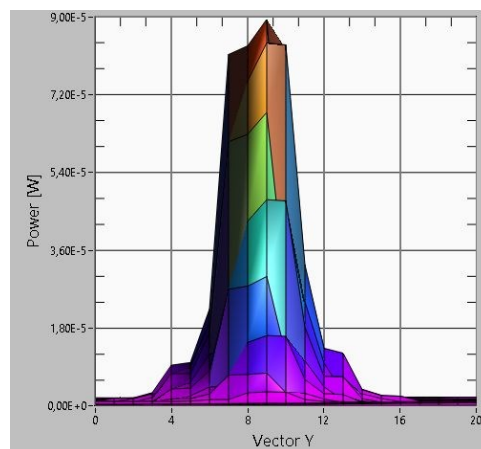
Obrázok E.12: 11-06-26 z pohľadu osi Y



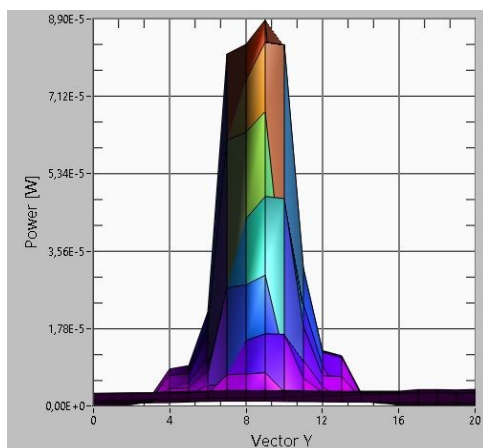
Obrázok E.13: 11-36-50 z pohľadu osi X



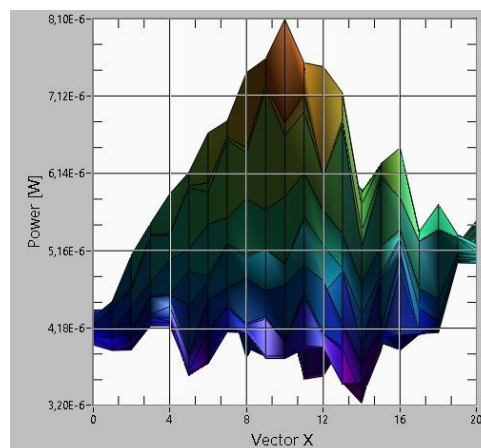
Obrázok E.16: 12-07-14 z pohľadu osi Y



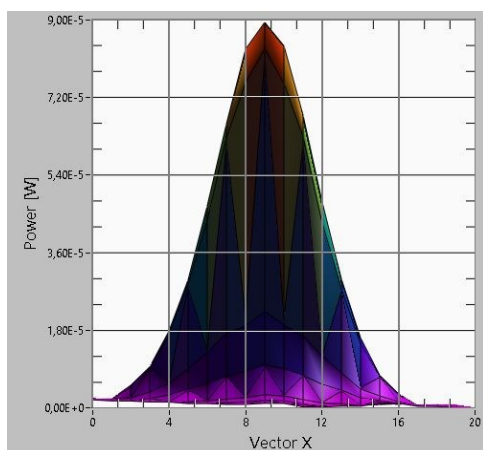
Obrázok E.14: 11-36-50 z pohľadu osi Y



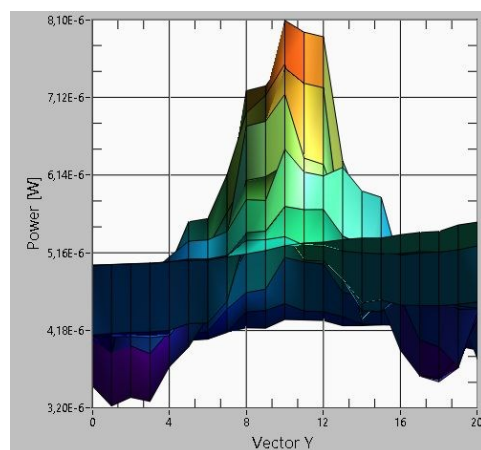
Obrázok E.17: 09-56-02 z pohľadu osi X



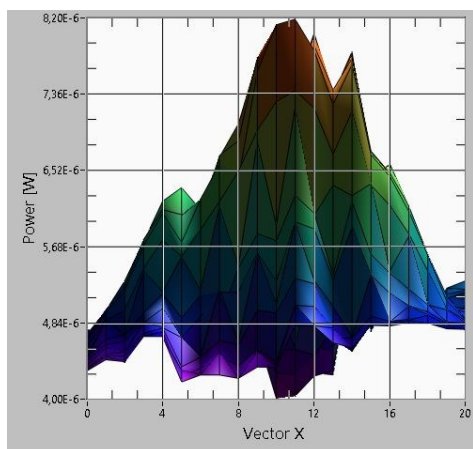
Obrázok E.15: 12-07-14 z pohľadu osi X



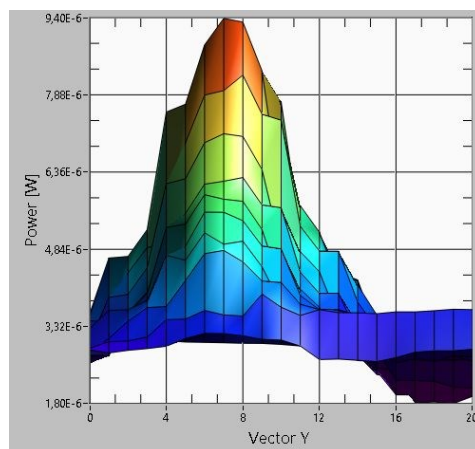
Obrázok E.18: 09-56-02 z pohľadu osi Y



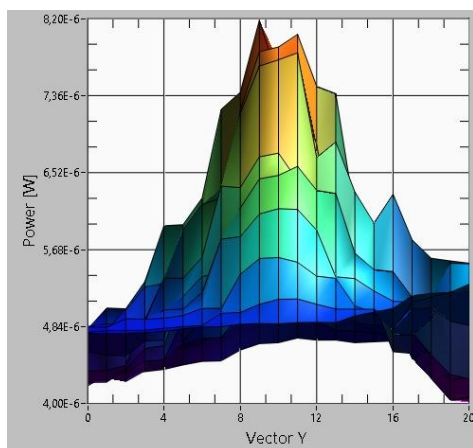
Obrázok E.19: 10-26-24 z pohľadu osi X



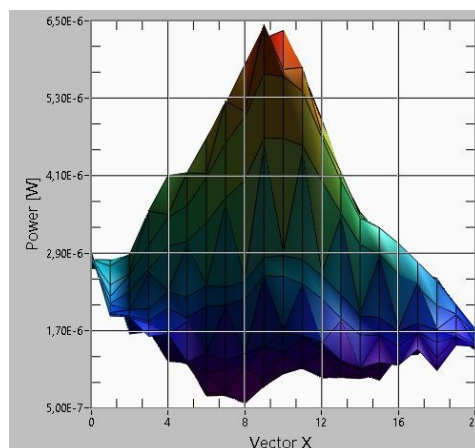
Obrázok E.22: 13-48-41 z pohľadu osi Y



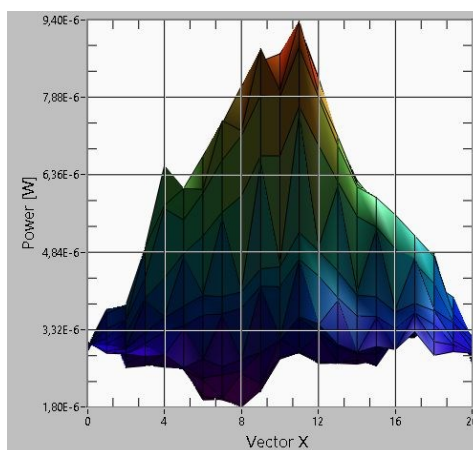
Obrázok E.20: 10-26-24 z pohľadu osi Y



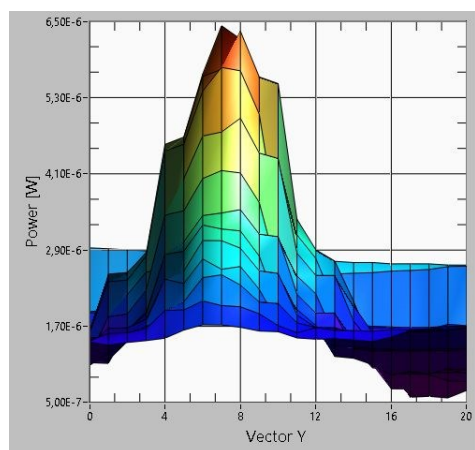
Obrázok E.23: 15-51-36 z pohľadu osi X



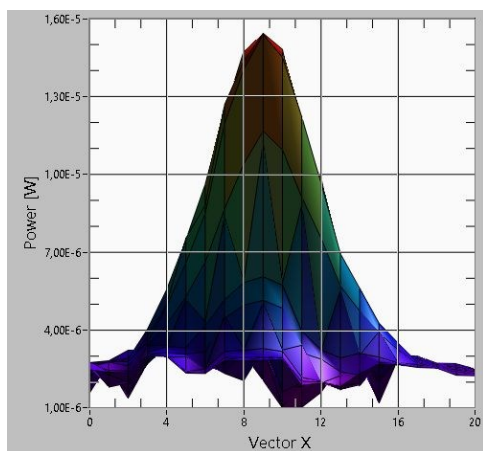
Obrázok E.21: 13-48-41 z pohľadu osi X



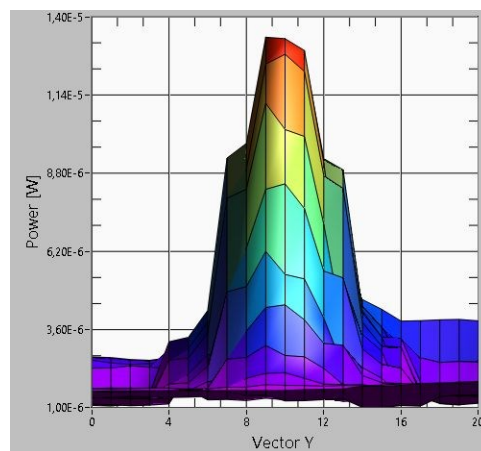
Obrázok E.24: 15-51-36 z pohľadu osi Y



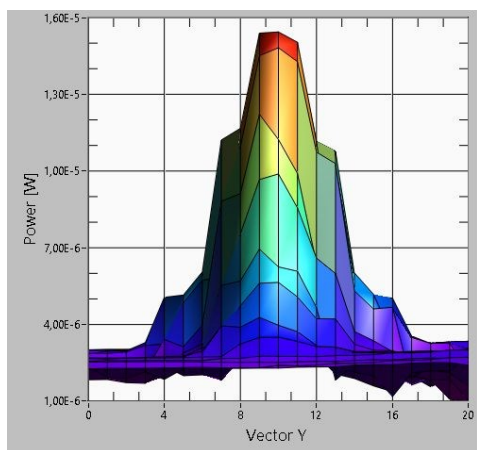
Obrázok E.25: 11-03-28 z pohľadu osi X



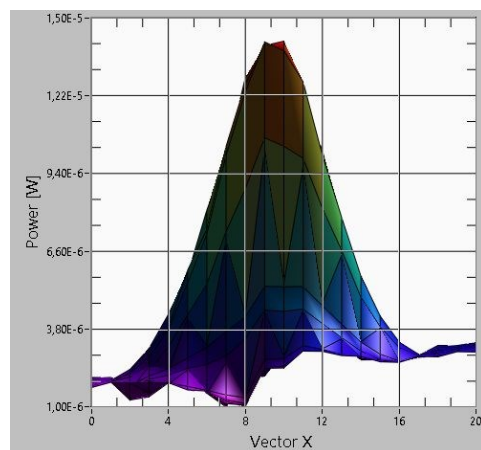
Obrázok E.28: 11-34-12 z pohľadu osi Y



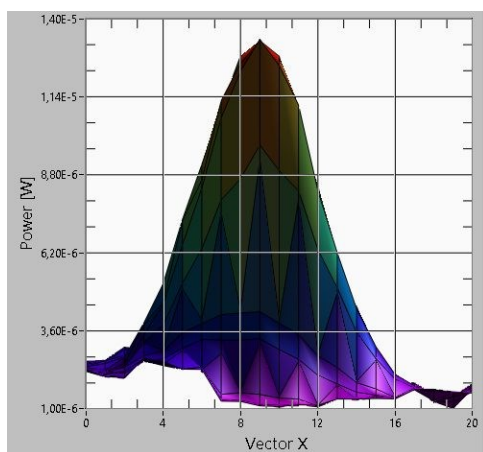
Obrázok E.26: 11-03-28 z pohľadu osi Y



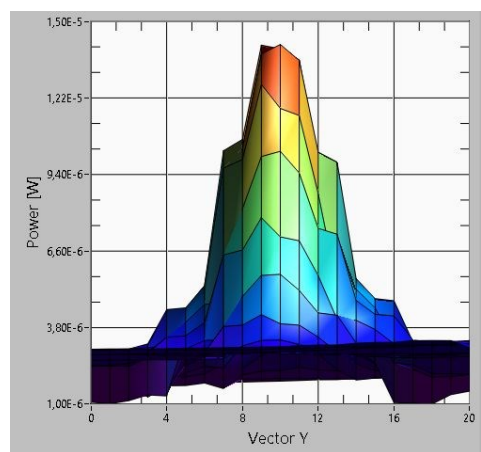
Obrázok E.29: 12-35-40 z pohľadu osi X



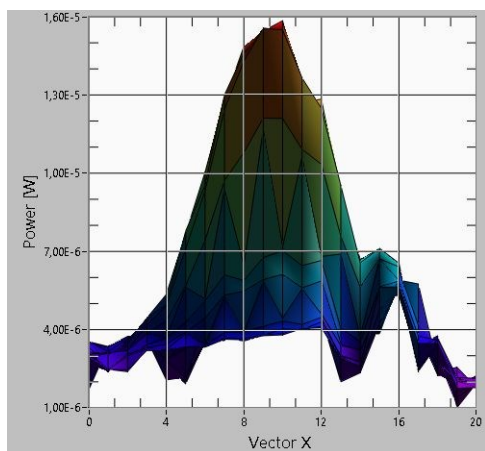
Obrázok E.27: 11-34-12 z pohľadu osi X



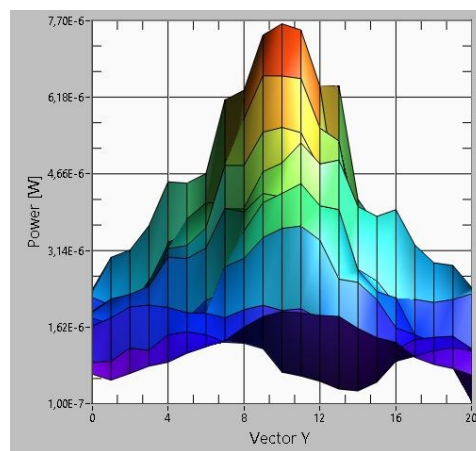
Obrázok E.30: 12-35-40 z pohľadu osi Y



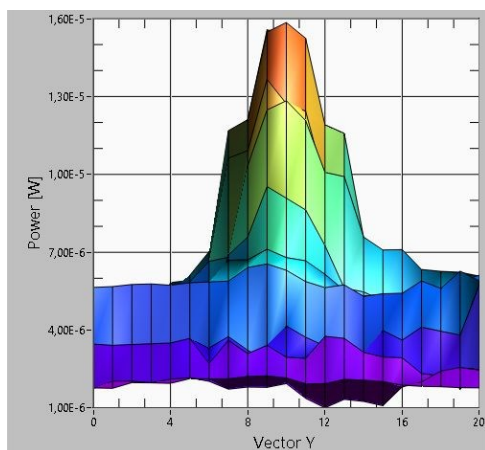
Obrázok E.31: 13-06-24 z pohľadu osi X



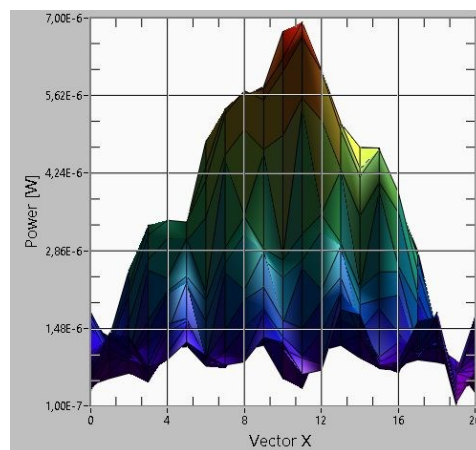
Obrázok E.34: 12-04-04 z pohľadu osi Y



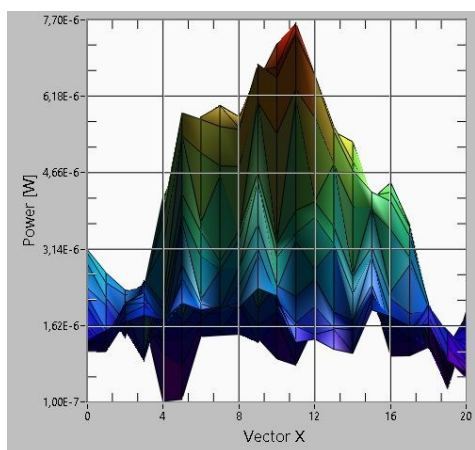
Obrázok E.32: 13-06-24 z pohľadu osi Y



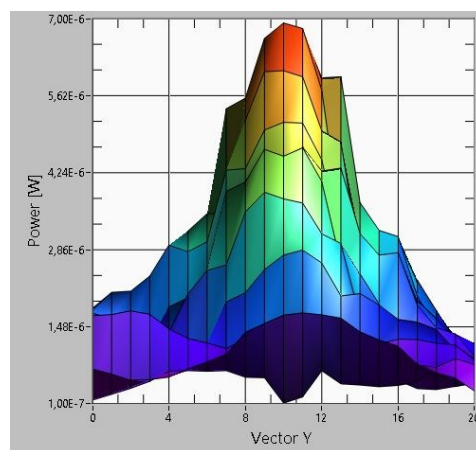
Obrázok E.35: 12-34-28 z pohľadu osi X



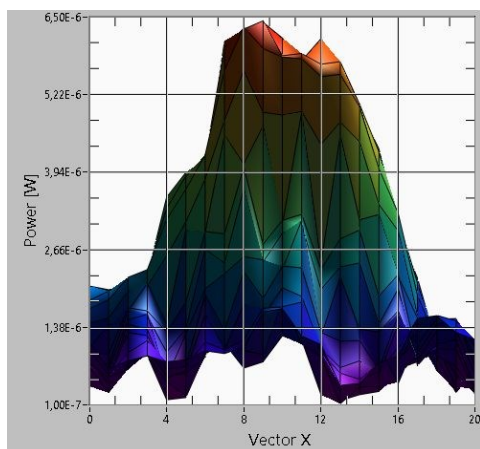
Obrázok E.33: 12-04-04 z pohľadu osi X



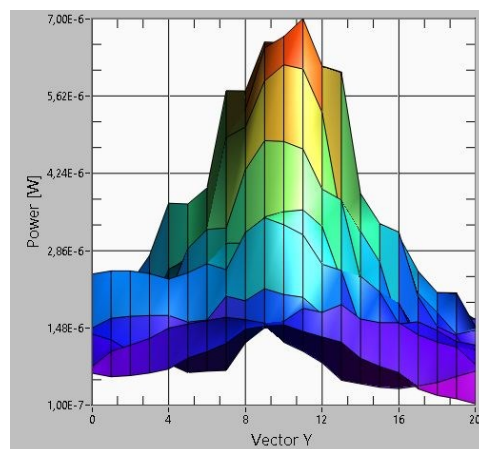
Obrázok E.36: 12-34-28 z pohľadu osi Y



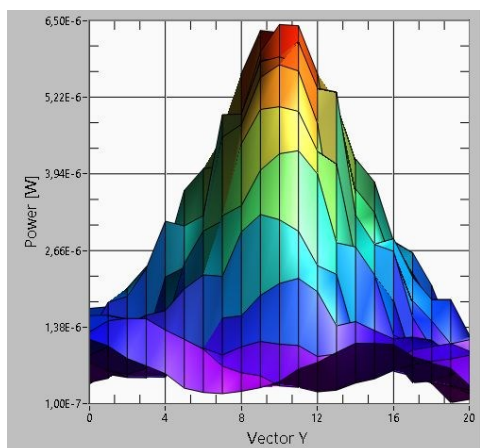
Obrázok E.37: 13-04-52 z pohľadu osi X



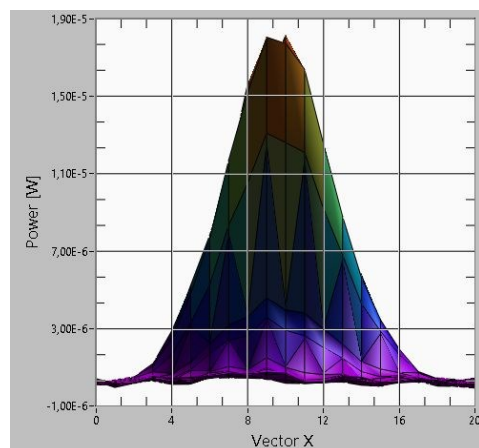
Obrázok E.40: 13-35-16 z pohľadu osi Y



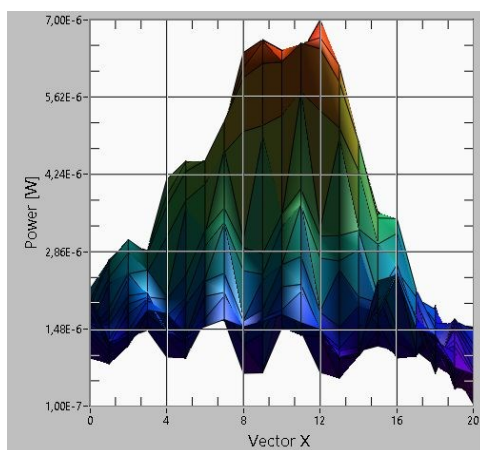
Obrázok E.38: 13-04-52 z pohľadu osi Y



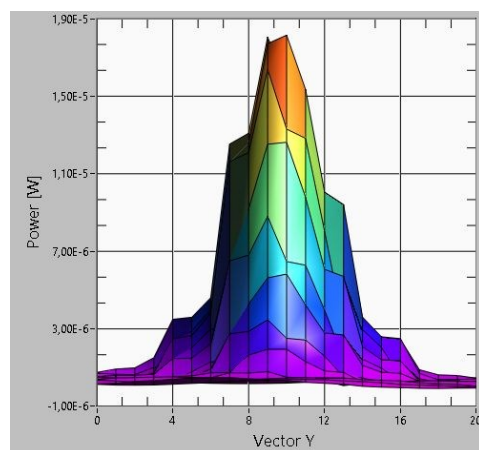
Obrázok E.41: 10-37-04 z pohľadu osi X



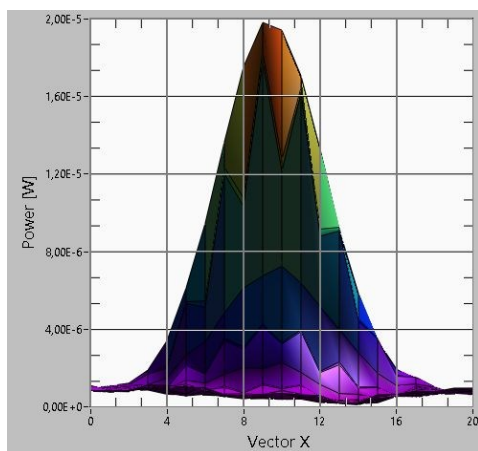
Obrázok E.39: 13-35-16 z pohľadu osi X



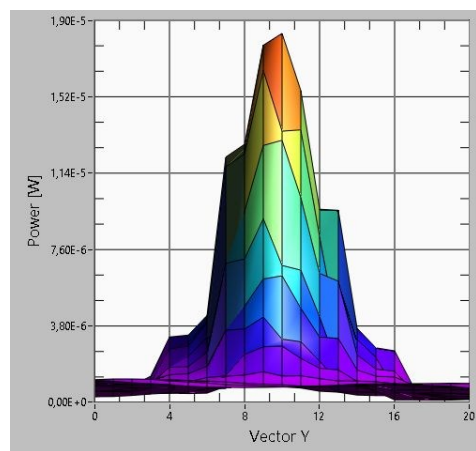
Obrázok E.42: 10-37-04 z pohľadu osi Y



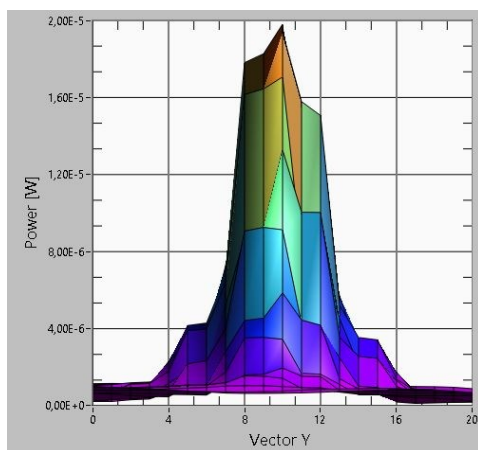
Obrázok E.43: 11-06-06 z pohľadu osi X



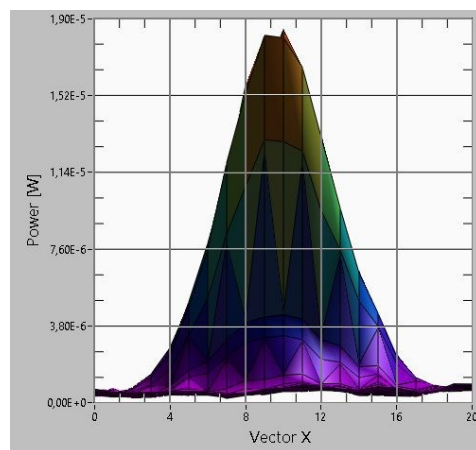
Obrázok E.46: 12-16-52 z pohľadu osi Y



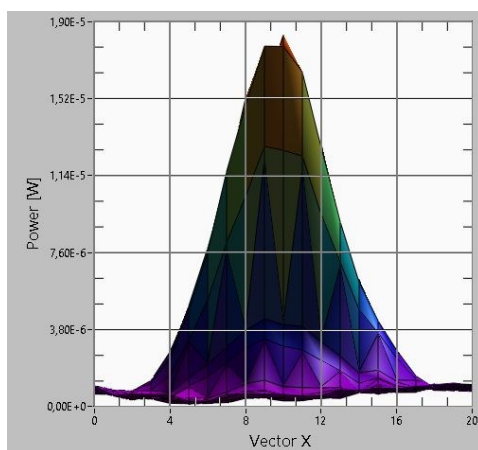
Obrázok E.44: 11-06-06 z pohľadu osi Y



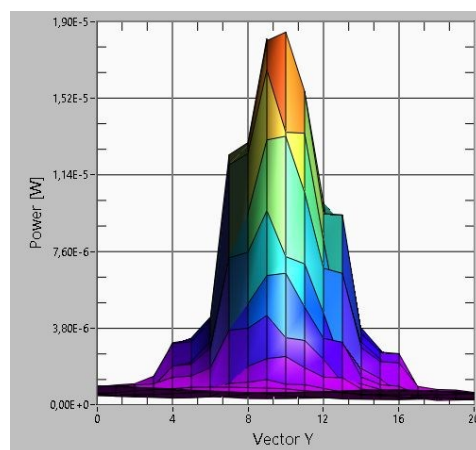
Obrázok E.47: 12-47-16 z pohľadu osi X



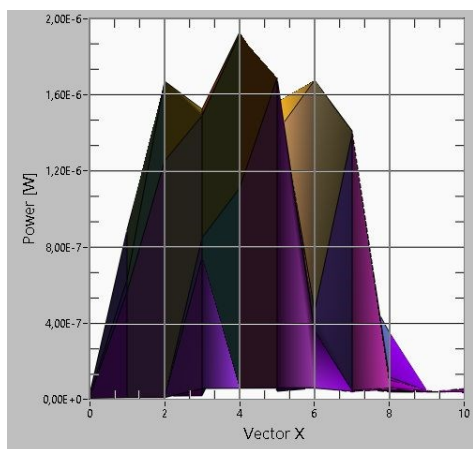
Obrázok E.45: 12-16-52 z pohľadu osi X



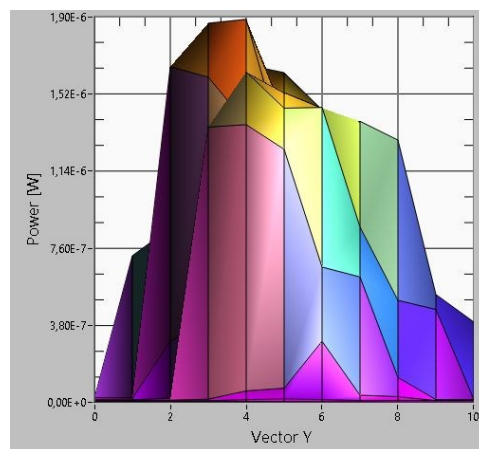
Obrázok E.48: 12-47-16 z pohľadu osi Y



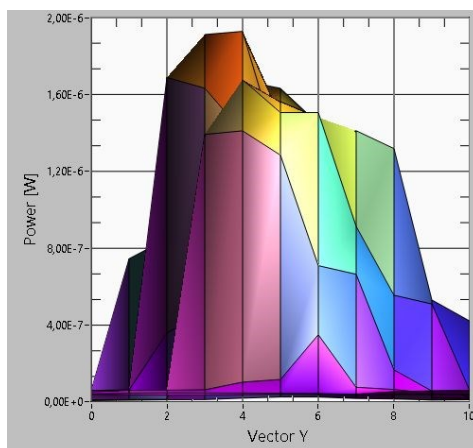
Obrázok E.49: 11-36-10 z pohľadu osi X



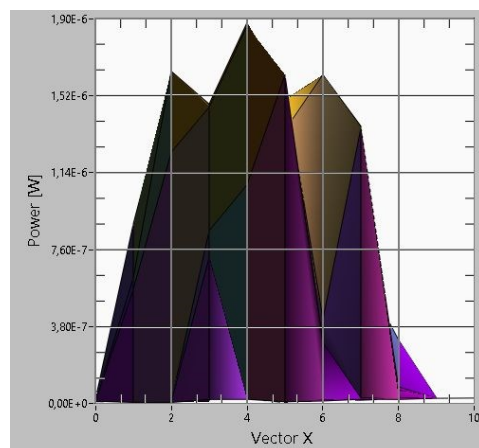
Obrázok E.52: 11-44-42 z pohľadu osi Y



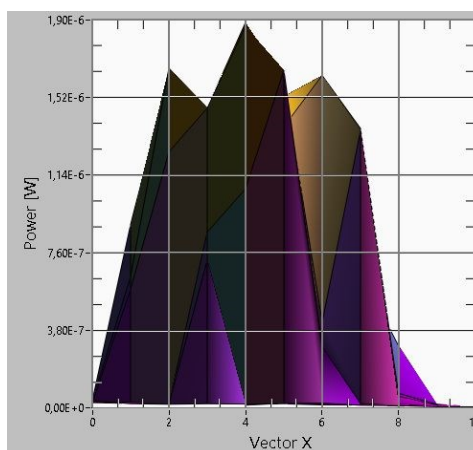
Obrázok E.50: 11-36-10 z pohľadu osi Y



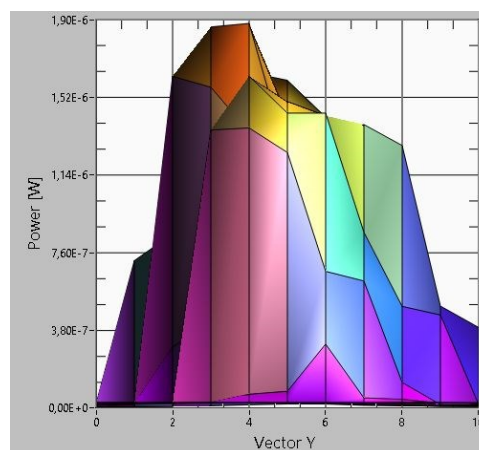
Obrázok E.53: 11-53-14 z pohľadu osi X



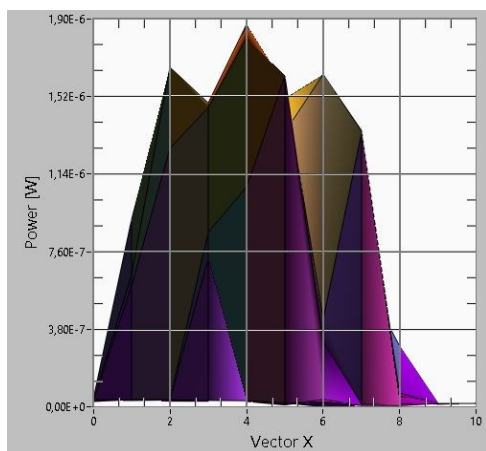
Obrázok E.51: 11-44-42 z pohľadu osi X



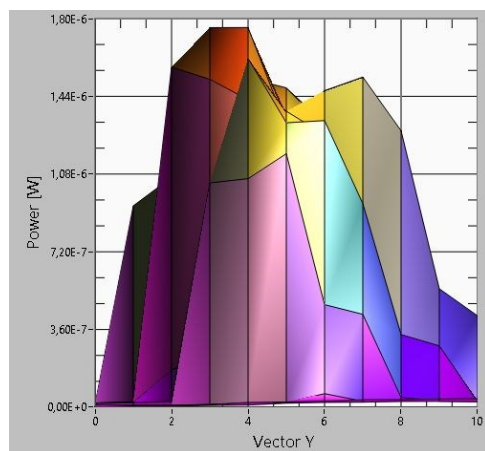
Obrázok E.54: 11-53-14 z pohľadu osi Y



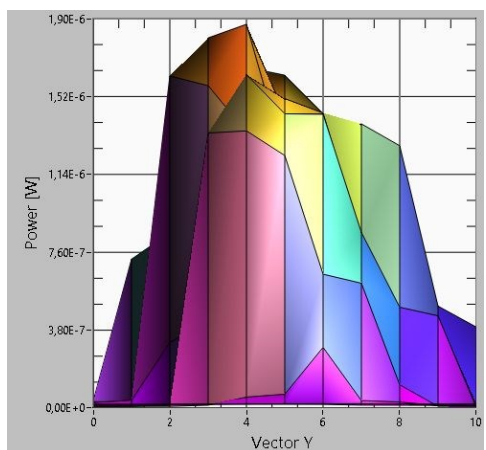
Obrázok E.55: 12-01-46 z pohľadu osi X



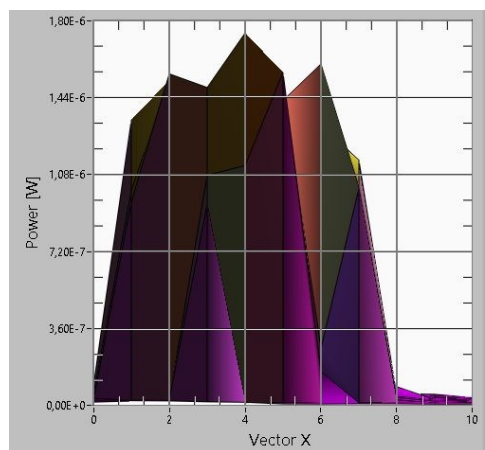
Obrázok E.58: 12-39-06 z pohľadu osi Y



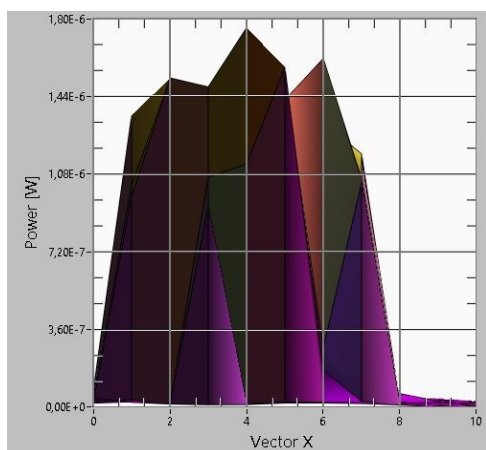
Obrázok E.56: 12-01-46 z pohľadu osi Y



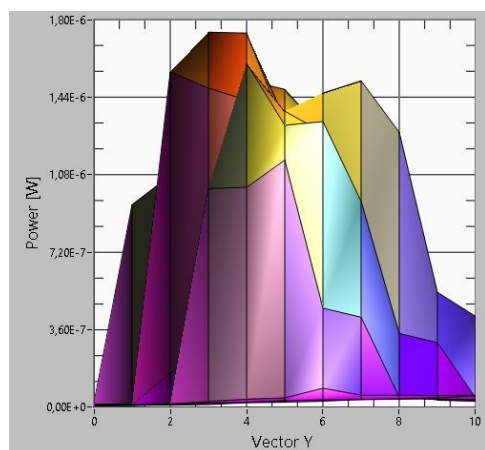
Obrázok E.59: 12-47-38 z pohľadu osi X



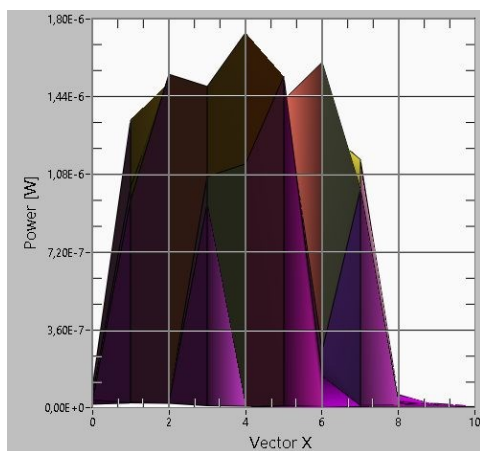
Obrázok E.57: 12-39-06 z pohľadu osi X



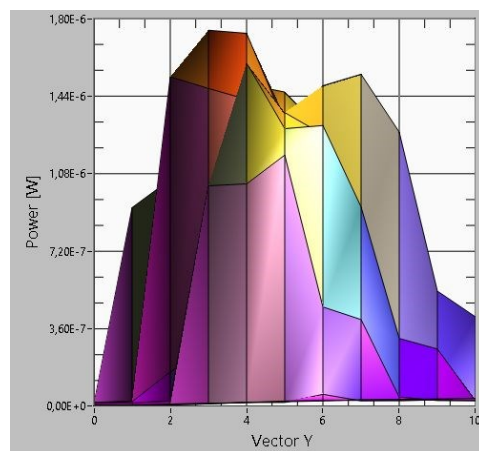
Obrázok E.60: 12-47-38 z pohľadu osi Y



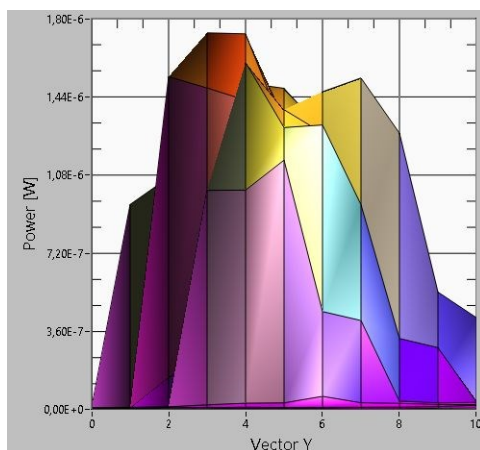
Obrázok E.61: 12-56-10 z pohľadu osi X



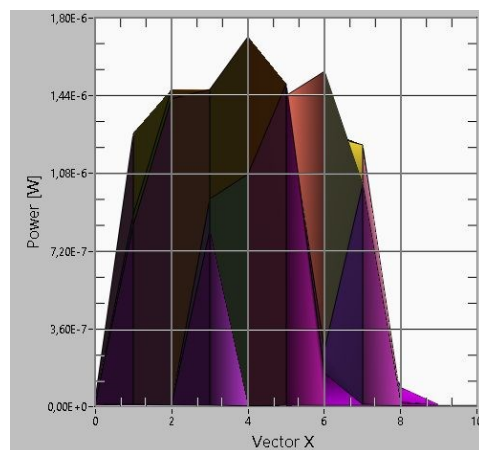
Obrázok E.64: 13-04-42 z pohľadu osi Y



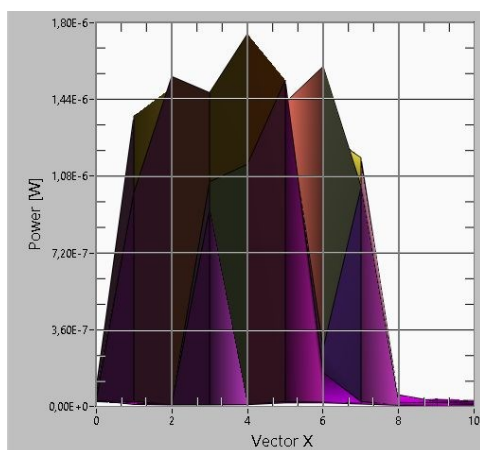
Obrázok E.62: 12-56-10 z pohľadu osi Y



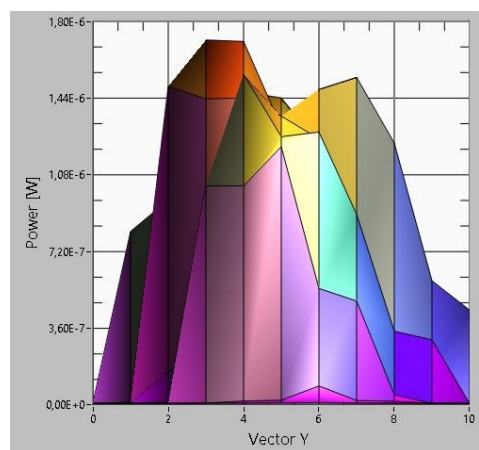
Obrázok E.65: 13-34-06 z pohľadu osi X



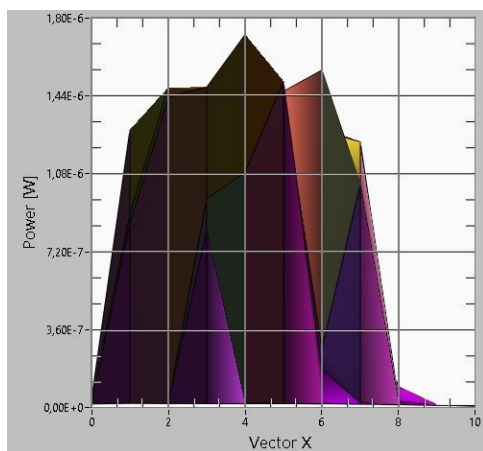
Obrázok E.63: 13-04-42 z pohľadu osi X



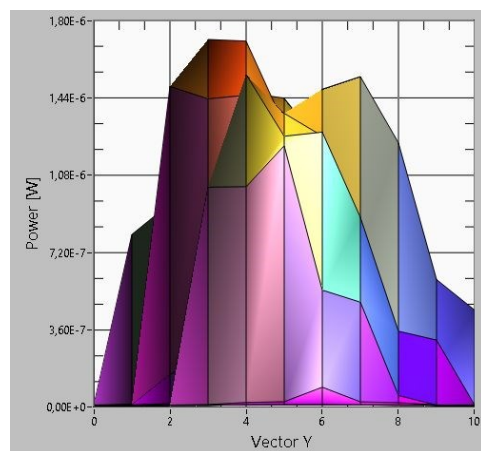
Obrázok E.66: 13-34-06 z pohľadu osi Y



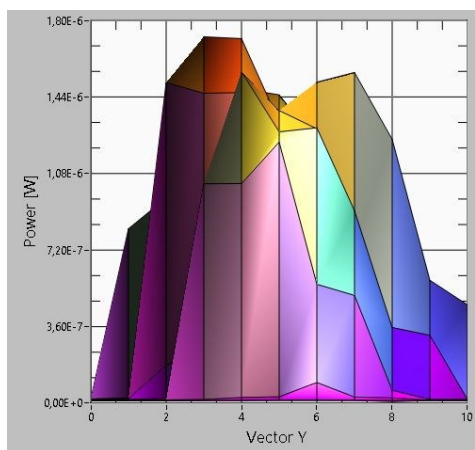
Obrázok E.67: 13-42-38 z pohľadu osi X



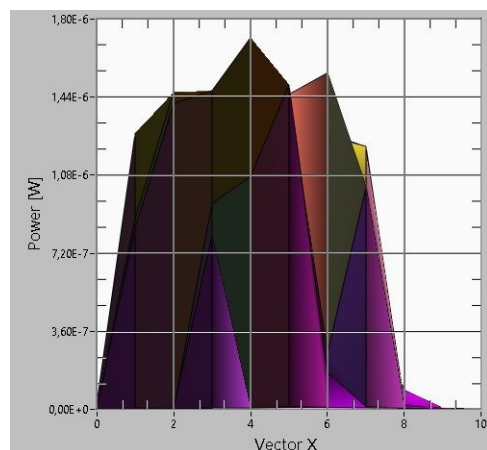
Obrázok E.70: 13-51-10 z pohľadu osi Y



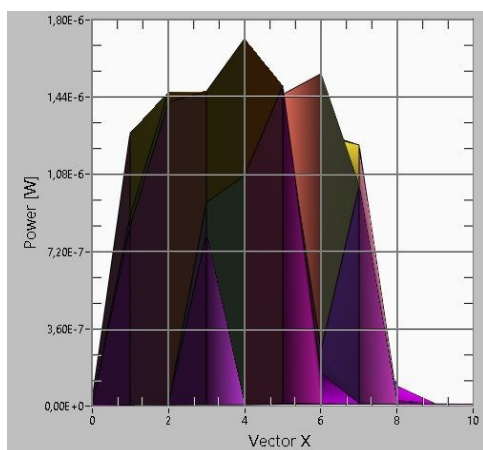
Obrázok E.68: 13-42-38 z pohľadu osi Y



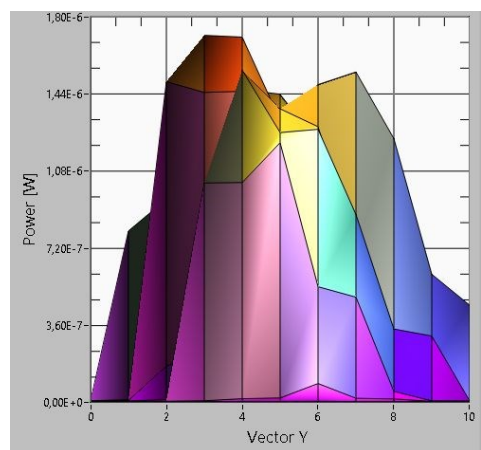
Obrázok E.71: 13-59-42 z pohľadu osi X



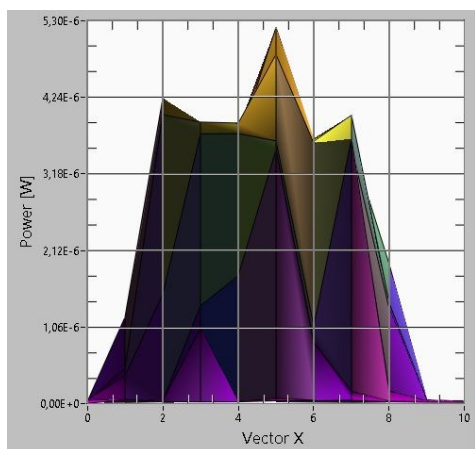
Obrázok E.69: 13-51-10 z pohľadu osi X



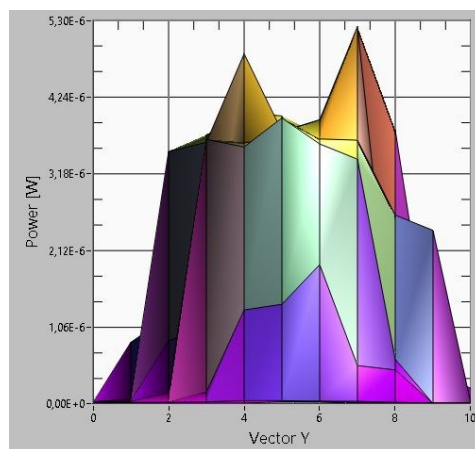
Obrázok E.72: 13-59-42 z pohľadu osi Y



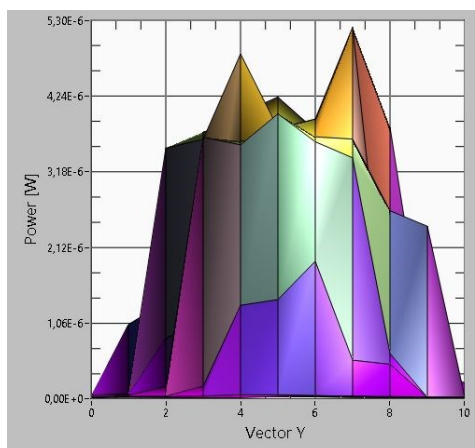
Obrázok E.73: 10-23-27 z pohľadu osi X



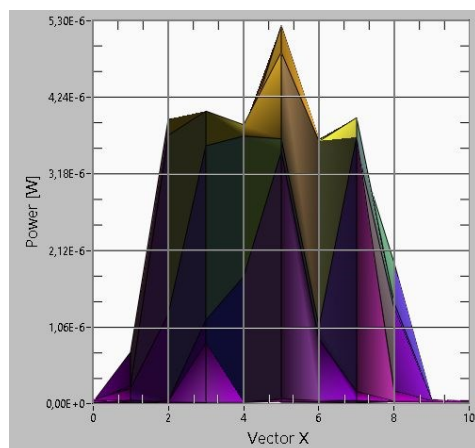
Obrázok E.76: 10-40-31 z pohľadu osi Y



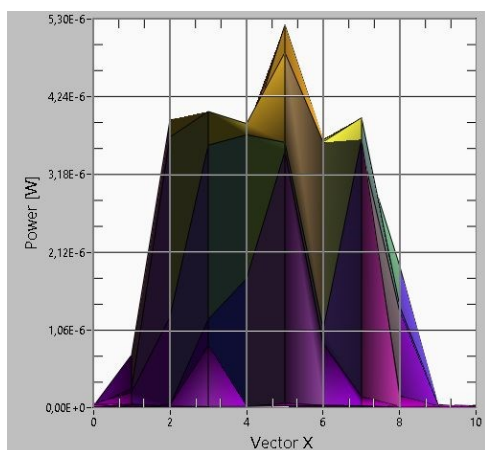
Obrázok E.74: 10-23-27 z pohľadu osi Y



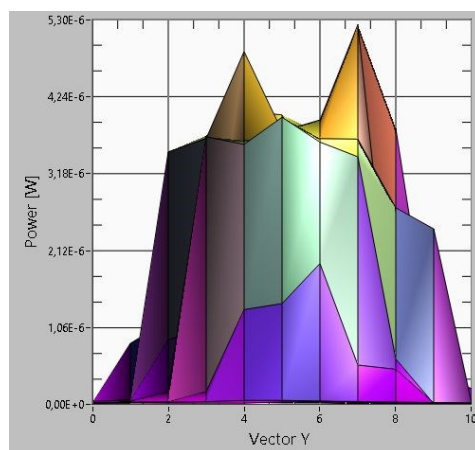
Obrázok E.77: 10-57-35 z pohľadu osi X



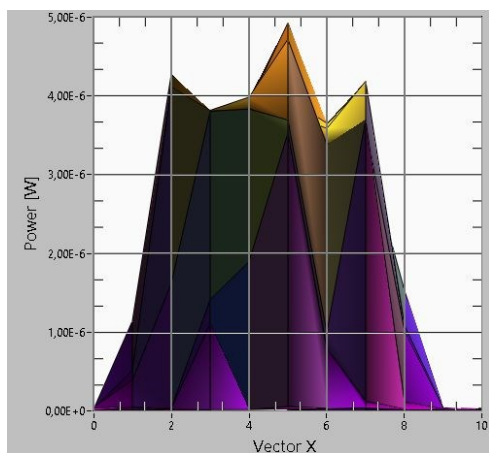
Obrázok E.75: 10-40-31 z pohľadu osi X



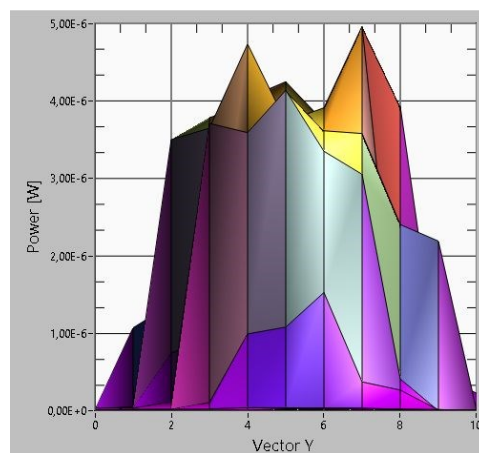
Obrázok E.78: 10-57-35 z pohľadu osi Y



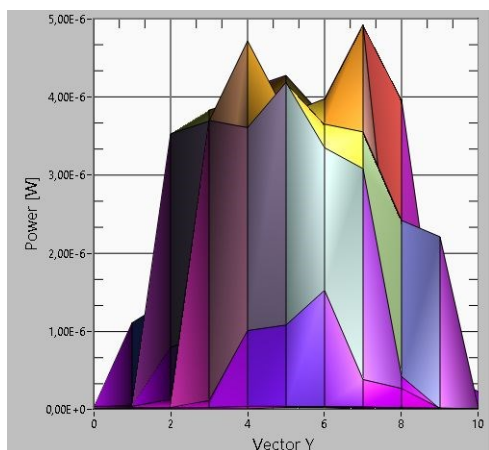
Obrázok E.79 09-43-11 z pohľadu osi X



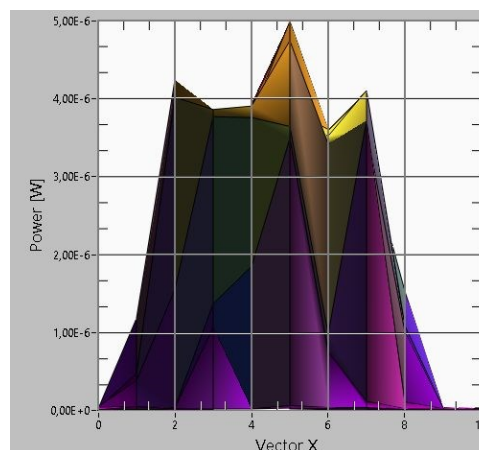
Obrázok E.82: 09-51-43 z pohľadu osi Y



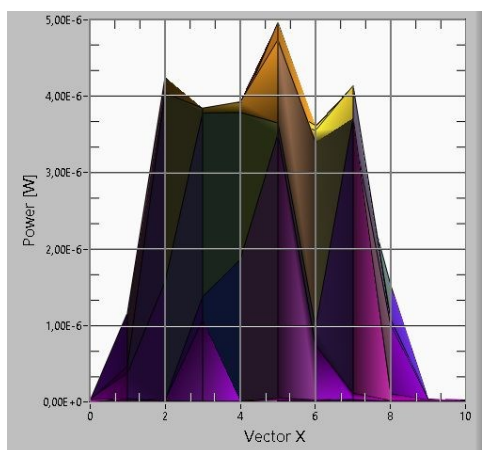
Obrázok E.80: 09-43-11 z pohľadu osi Y



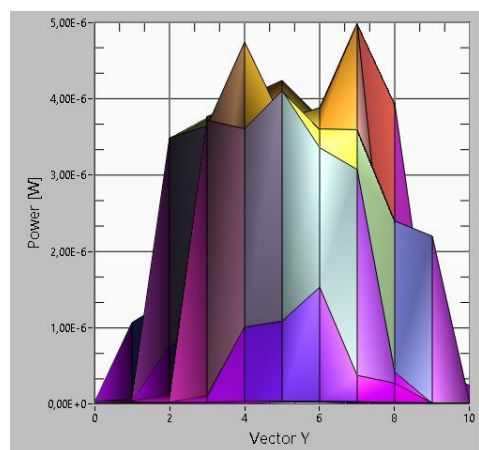
Obrázok E.83: 10-00-15 z pohľadu osi X



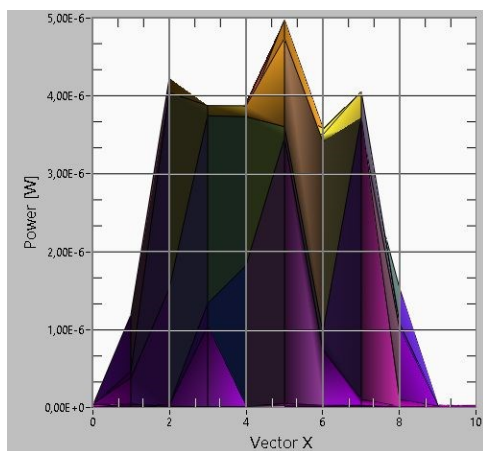
Obrázok E.81: 09-51-43 z pohľadu osi X



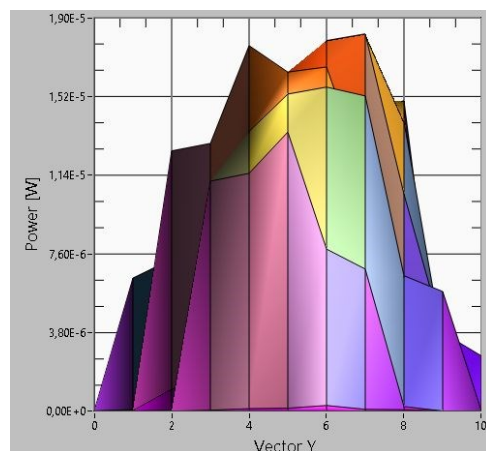
Obrázok E.84: 10-00-15 z pohľadu osi Y



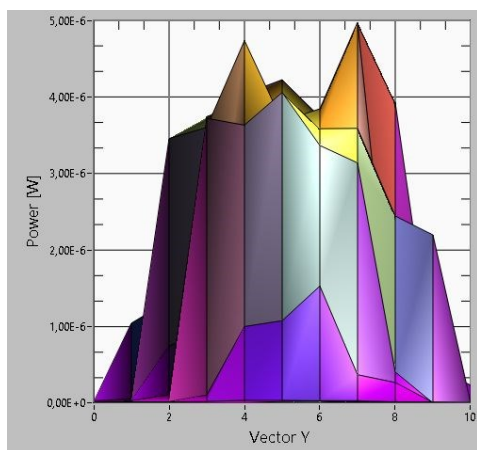
Obrázok E.85: 10-08-47 z pohľadu osi X



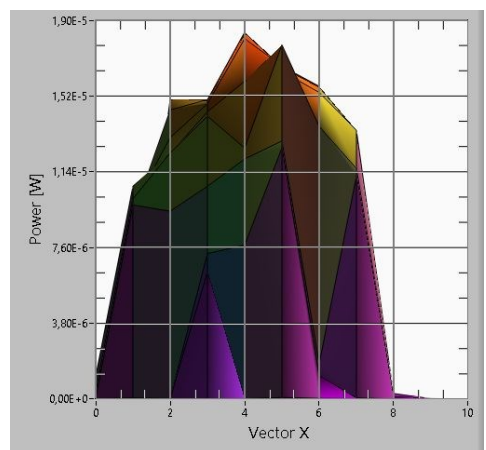
Obrázok E.88: 15-27-42 z pohľadu osi Y



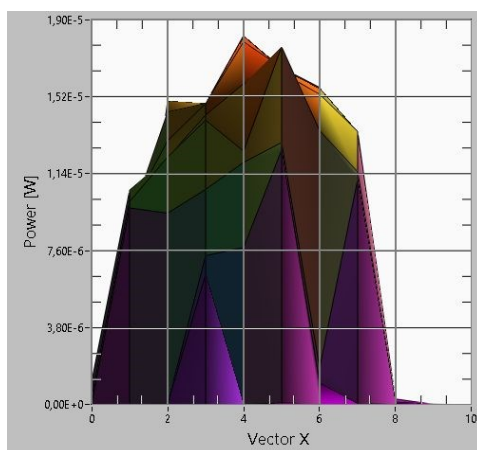
Obrázok E.86: 10-08-47 z pohľadu osi Y



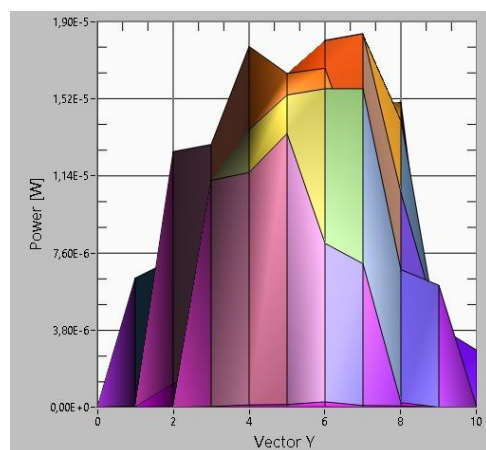
Obrázok E.89: 15-36-14 z pohľadu osi X



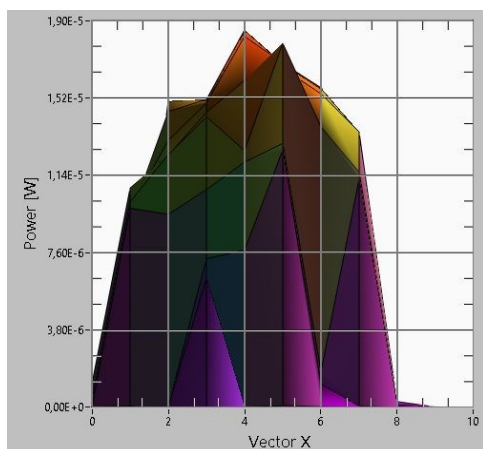
Obrázok E.87: 15-27-42 z pohľadu osi X



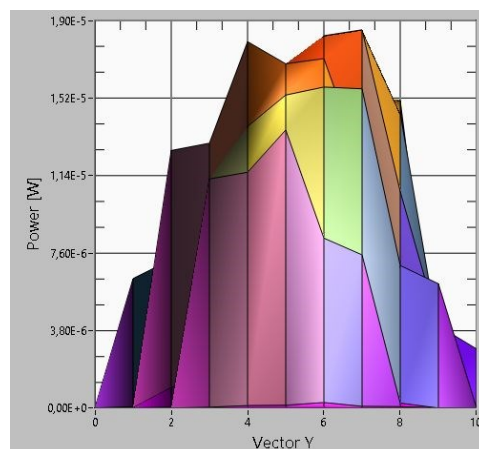
Obrázok E.90: 15-36-14 z pohľadu osi Y



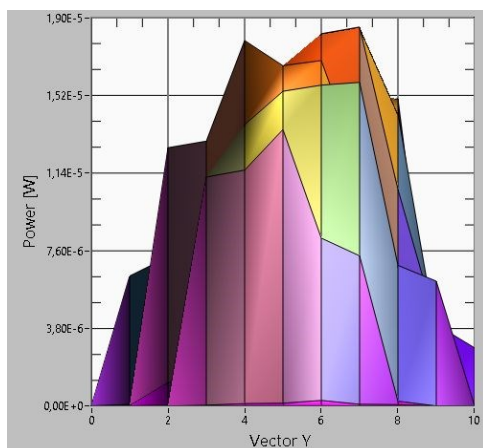
Obrázok E.91: 15-44-46 z pohľadu osi X



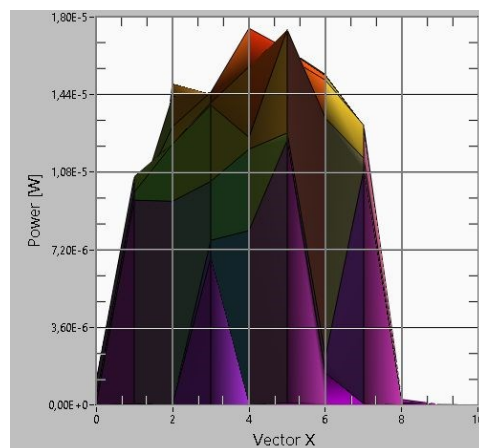
Obrázok E.94: 15-53-18 z pohľadu osi Y



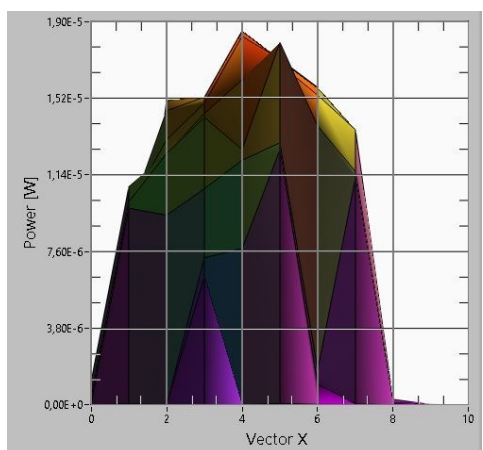
Obrázok E.92: 15-44-46 z pohľadu osi Y



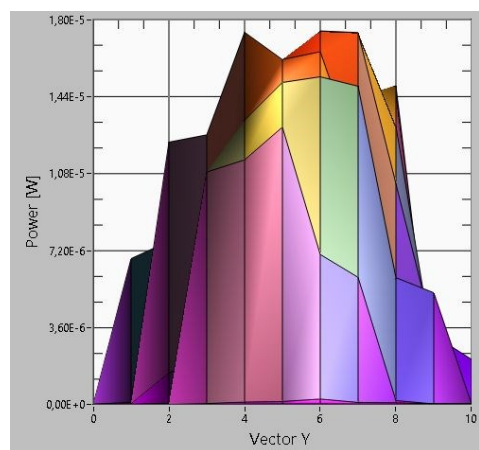
Obrázok E.95: 14-39-14 z pohľadu osi X



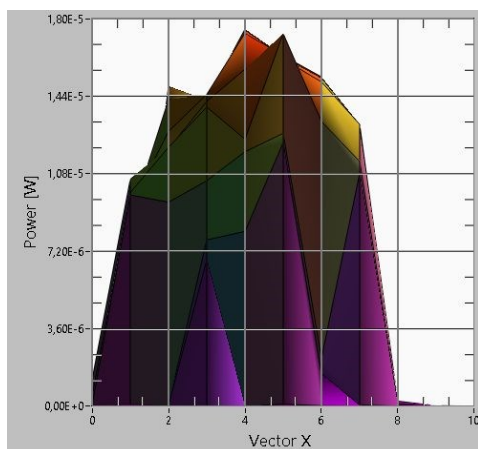
Obrázok E.93: 15-53-18 z pohľadu osi X



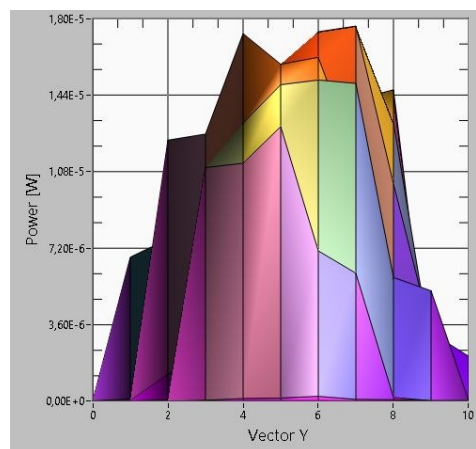
Obrázok E.96: 14-39-14 z pohľadu osi Y



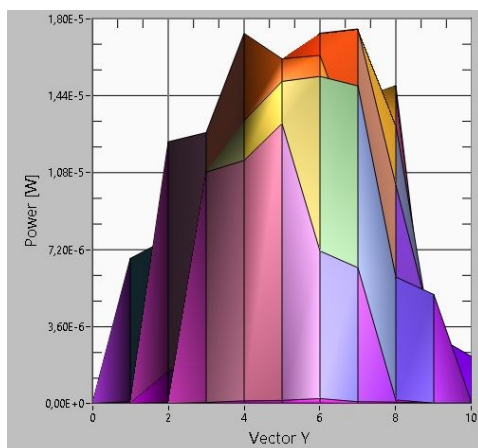
Obrázok E.97: 14-47-46 z pohľadu osi X



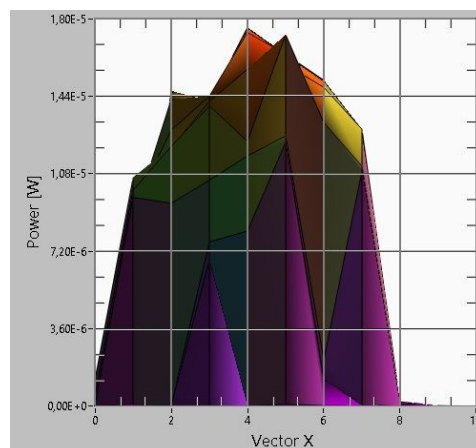
Obrázok E.100: 14-56-18 z pohľadu osi Y



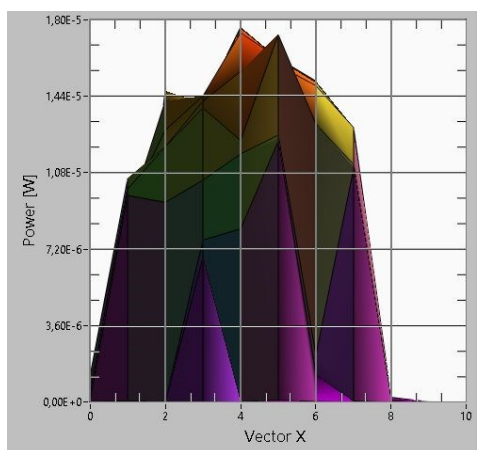
Obrázok E.98: 14-47-46 z pohľadu osi Y



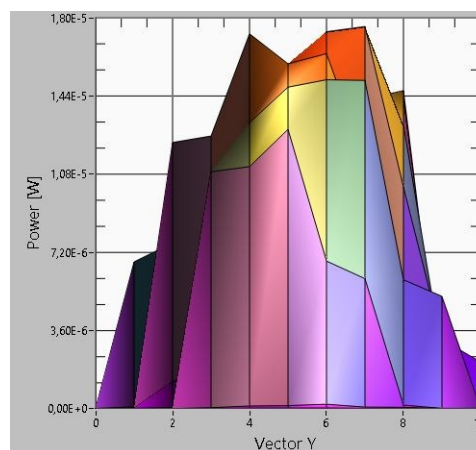
Obrázok E.101: 15-04-50 z pohľadu osi X



Obrázok E.99: 14-56-18 z pohľadu osi X

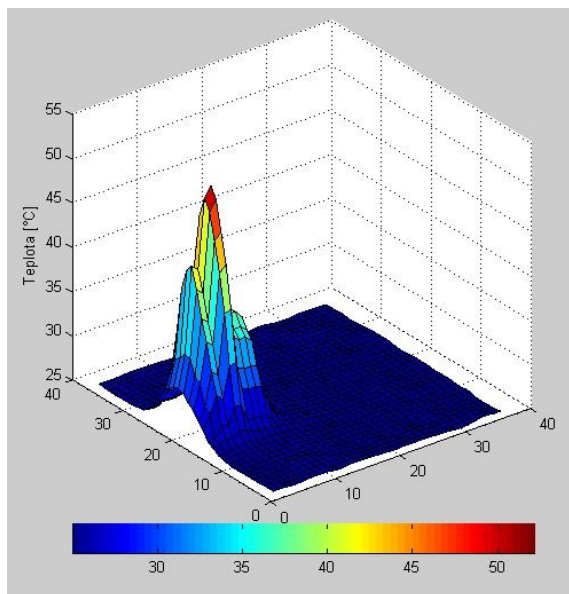


Obrázok E.102: 15-04-50 z pohľadu osi Y

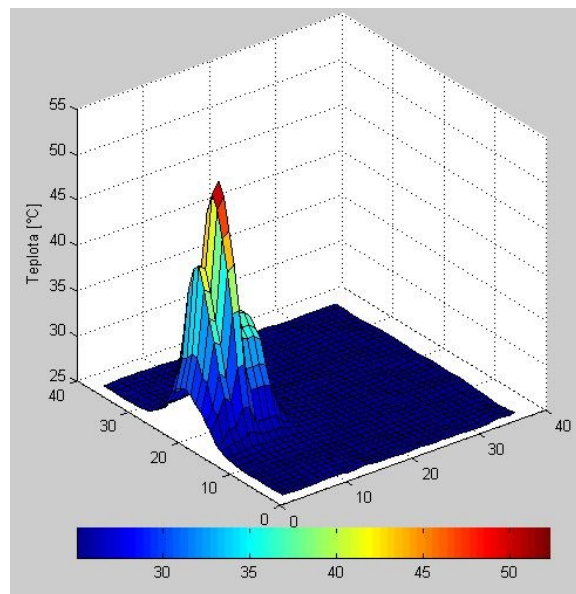


Príloha F: *Ostatné grafy z merania rozloženia teploty DTS systémom*

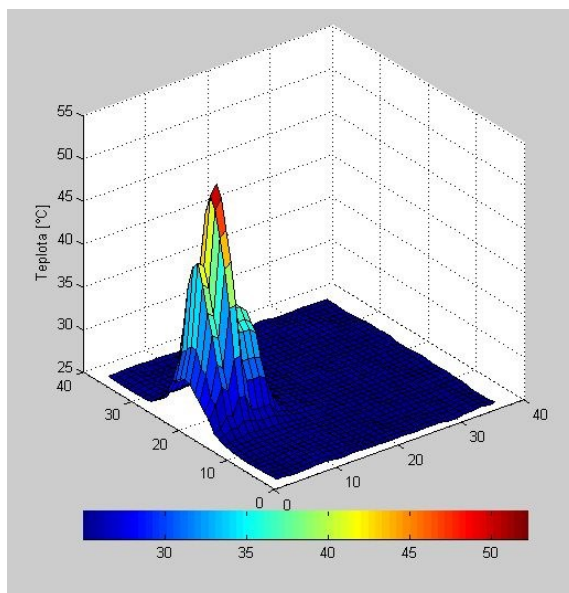
Obrázok F.1: *Graf rozloženia teploty ventilátorového ohrievača 1*



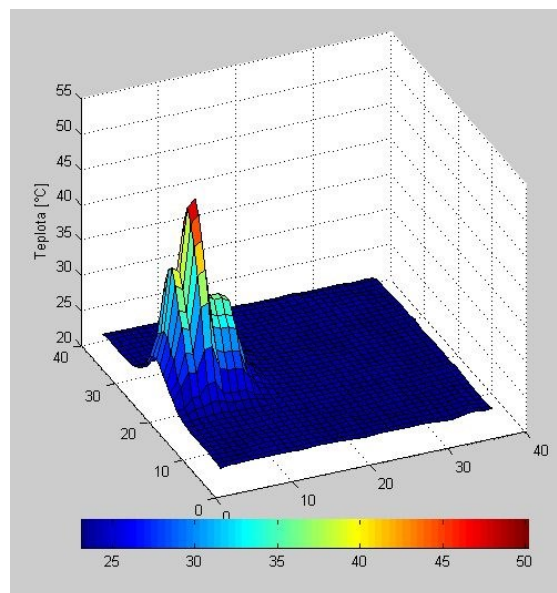
Obrázok F.3: *Graf rozloženia teploty ventilátorového ohrievača 3*



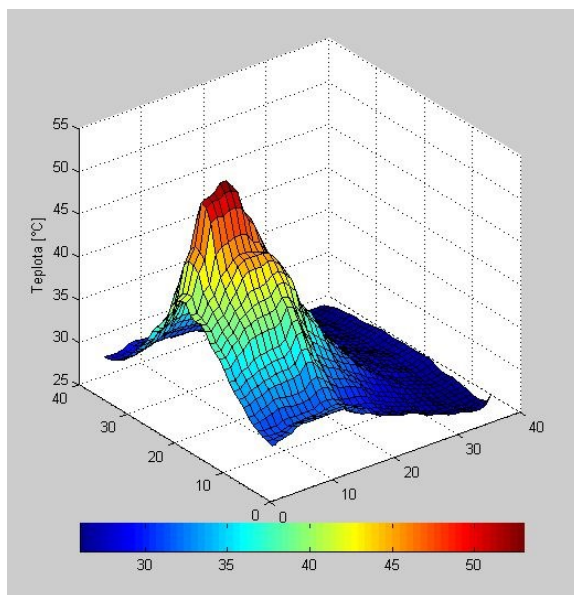
Obrázok F.2: *Graf rozloženia teploty ventilátorového ohrievača 2*



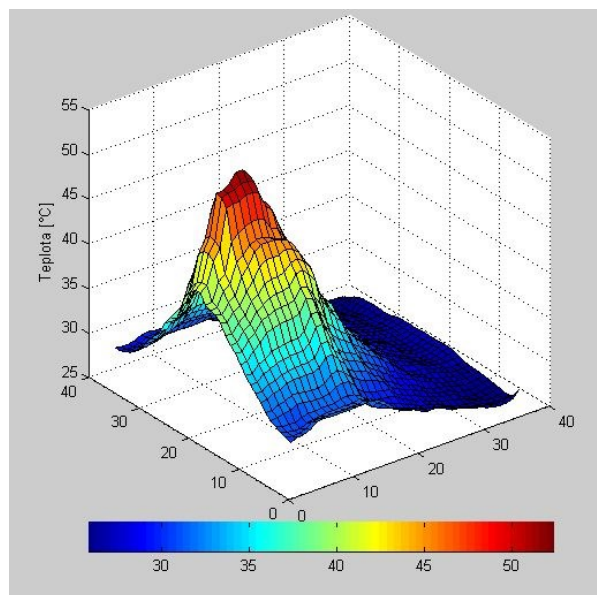
Obrázok F.4: *Graf rozloženia teploty ventilátorového ohrievača 4*



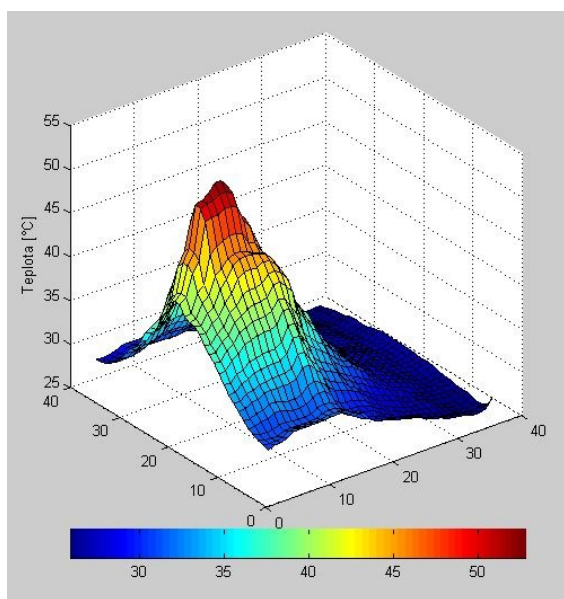
Obrázok F.5: Graf rozloženia teploty elektrického variča 1



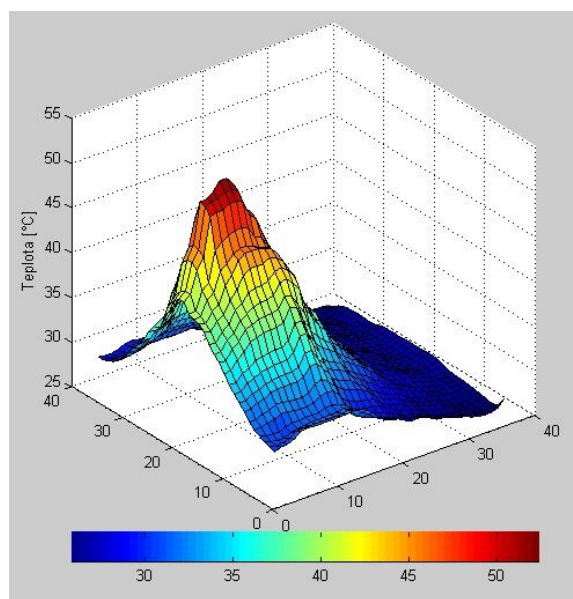
Obrázok F.7: Graf rozloženia teploty elektrického variča 3



Obrázok F.6: Graf rozloženia teploty elektrického variča 2



Obrázok F.8: Graf rozloženia teploty elektrického variča 4



Príloha G: *Tabuľky s parazitnými hodnotami meraní*

Tabuľka G.1: *Tabuľka parazitných hodnôt jednotlivých meraní neupraveného zväzku*

Laserový modul 408 nm		Laserový modul 650 nm	
Bez vplyvu			
Parazitný výkon [μW]	Súbor	Parazitný výkon [μW]	Súbor
1,62	13-48-45	0,80	10-05-39
1,35	14-19-06	1,05	10-36-02
0,77	14-49-30	1,55	11-06-26
1,01	15-19-54	2,13	11-36-50
1,31	15-50-18	2,75	12-07-14
Vplyv ventilátorového ohrievača			
Parazitný výkon [μW]	Súbor	Parazitný výkon [μW]	Súbor
2,68	09-56-02	5,37	11-03-28
2,74	10-26-24	5,44	11-34-12
1,94	13-48-41	4,32	12-04-56
2,13	15-20-52	4,10	12-35-40
0,93	15-51-36	4,33	13-06-24
Vplyv elektrického variča			
Parazitný výkon [μW]	Súbor	Parazitný výkon [μW]	Súbor
5,47	12-04-04	2,41	10-37-04
5,90	12-34-28	1,50	11-06-06
5,91	13-04-52	1,57	11-46-28
4,83	13-35-16	1,20	12-16-52
4,83	14-13-07	1,53	12-47-16

Tabuľka G.2: *Tabuľka parazitných hodnôt jednotlivých meraní upraveného zväzku laserového modulu 408 nm*

Bez vplyvu		Vplyv ventilátorového ohrievača		Vplyv elektrického variča	
Parazitný výkon [μW]	Súbor	Parazitný výkon [μW]	Súbor	Parazitný výkon [μW]	Súbor
0,07	11-27-37	0,02	13-25-00	0,10	12-30-32
0,08	11-36-10	0,04	13-34-06	0,09	12-39-06
0,10	11-44-42	0,03	13-42-38	0,08	12-49-38
0,09	11-53-14	0,04	13-51-10	0,08	12-56-10
0,08	12-01-46	0,05	13-59-42	0,06	13-04-42

Tabuľka G.3: *Tabuľka parazitných hodnôt jednotlivých meraní upraveného zväzku laserového modulu 650 nm*

Bez vplyvu		Bez vplyvu	
Parazitný výkon [μW]	Súbor	Parazitný výkon [μW]	Súbor
0,02	10-23-27	0,06	15-19-08
0,03	10-31-59	0,04	15-27-42
0,03	10-40-31	0,04	15-36-14
0,03	10-40-03	0,03	15-44-46
0,02	10-57-35	0,03	15-53-18
Vplyv ventilátorového ohrievača		Vplyv elektrického variča	
Parazitný výkon [μW]	Súbor	Parazitný výkon [μW]	Súbor
0,01	09-34-39	0,07	14-30-40
0,01	09-43-11	0,08	14-39-14
0,02	09-51-43	0,09	14-47-46
0,02	10-00-15	0,09	14-56-18
0,02	10-08-47	0,09	15-04-50

Príloha H: *Tabuľky premenných použitých v programe LBIP_Measurement*

Tabuľka H.1: *Zoznam premenných indikujúceho typu a ich popis*

Názov	Typ	Viditeľnosť	Popis
<i>Error log</i>	String	Nie	Záznam o chybe merača výkonu.
<i>Readout String</i>	String	Áno	Naformátovaná hodnota spriemerovanej hodnoty.
<i>New</i>	Boolean	Áno	Indikátor sa rozžiari ak sa spriemeruje nová hodnota.
<i>Power Meter Sensor Flags</i>	Boolean	Áno	1 - snímač výkonu, 2 - snímač energie, 16 - nastaviteľnosť odpovede, 32 - nastaviteľnosť vlnovej dĺžky, 256 - výskyt tepelného senzoru
<i>Sensor Name</i>	String	Áno	Názov pripojeného senzoru.
<i>Sensor SN</i>	String	Áno	Sériové číslo pripojeného senzoru.
<i>IDN String</i>	String	Áno	Odpoveď merača výkonu na príkaz *idn?: výrobca/ číslo modelu /sériové číslo / verzia firmvéru
<i>Readout Value</i>	Double	Áno	Zaznamenaná hodnota merača výkonu v plnom rozlíšení.
<i>error out X</i>	Cluster	Nie	Zhluk premenných popisujúcich chybu z riadiacej jednotky osi X. Skladá sa z troch premenných.
<i>status</i>	Boolean	Nie	Oznámenie, či nastala chyba.
<i>code</i>	I32	Nie	Kód chyby alebo varovania.
<i>source</i>	String	Nie	Reťazec popisujúci zdroj chyby.
<i>error out Y</i>	Cluster	Nie	Zhluk premenných popisujúcich chybu z riadiacej jednotky osi y. Skladá sa z rovnakých premenných popísaných u osi X.
<i>Iteration X</i>	I32	Nie	Iterácia cyklu posuvu osi X.
<i>Iteration Y</i>	I32	Nie	Iterácia cyklu posuvu osi Y.
<i>End</i>	Boolean	Áno	Koniec jedného z meraní.
<i>X Axis Step [cm]</i>	Double	Áno	Krok posuvu osi X v cm.
<i>Y Axis Step [cm]</i>	Double	Áno	Krok posuvu osi Y v cm.
<i>File Header</i>	String	Nie	Hlavička súboru nameraných hodnôt.
<i>Saved String</i>	String	Áno	Uložený reťazec nameranej hodnoty.
<i>Setup Ready Indicator</i>	Boolean	Áno	Svetelný rám tlačidla <i>Setup Ready</i> . Ak žiari nastavenie programu už bolo vykonané.
<i>Measure Number</i>	I32	Áno	Číslo merania, ktoré sa práve vykonáva.
<i>Stop Indicator</i>	Boolean	Áno	Svetelný rám tlačidla <i>STOP</i> . Ak žiari program sa začal ukončovať.
<i>Vector X</i>	I32	Nie	Veľkosť vektoru osi X.
<i>Vector Y</i>	I32	Nie	Veľkosť vektoru osi Y.
<i>Help End</i>	Boolean	Nie	Indikuje ukončenie funkcie tlačidla <i>HELP</i> .

Tabuľka H.2: Zoznam premenných riadiaceho typu a ich popis

Názov	Typ	Popis
<i>Averaging Rate</i>	I32	Počet hodnôt (vzoriek) pre priemer výslednej hodnoty.
<i>Readout Config</i>	String	Určí parameter merania. POW - výkon [W], CURR - prúd [A], VOLT - napätie [V], ENER - energia [J], PDEN - hustota výkonu [W/cm], EDEN- hustota energie [J/cm], FREQ - frekvencia [Hz], RES - odpor [Ω], TEMP- teplota [°C].
<i>Timeout [ms]</i>	I32	Čas, počas ktorého bude merač výkonu vzorkovať.
<i>Serial X Axis</i>	I32	Sériové číslo riadiacej jednotky posuvu pre osu X.
<i>Serial Y Axis</i>	I32	Sériové číslo riadiacej jednotky posuvu pre osu Y.
<i>MG17 Motor X Axis</i>	Objekt	Ovládač riadiacej jednotky posuvu pre osu X.
<i>MG17 Motor Y Axis</i>	Objekt	Ovládač riadiacej jednotky posuvu pre osu Y.
<i>X Axis Size [cm]</i>	Double	Veľkosť osi X v cm.
<i>Y Axis Size [cm]</i>	Double	Veľkosť osi Y v cm.
<i>START</i>	Boolean	Tlačidlo pre spustenie merania.
<i>Mode</i>	Boolean	Mód resp. režim merania.
<i>Next Step</i>	Boolean	Povel pre ďalší krok v prípade poloautomatického režimu.
<i>Path to Folder</i>	Path	Cesta k zložke pre súbory s nameranými hodnotami.
<i>Presetup</i>	Boolean	Prednastavenie hodnôt ovládača riadiacej jednotky.
<i>Setup</i>	Boolean	Signál pre ukončenie základného nastavenia.
<i>Count</i>	I32	Počet celkových meraní.
<i>STOP</i>	Boolean	Tlačidlo pre ukončenie programu.
<i>HELP</i>	Boolean	Tlačidlo, pre zobrazenie nápovede.
<i>Period [ms]</i>	I32	Čas určený pre pohyb posuvov a uloženie nameranej hodnoty.